

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт – Энергетический
Направление подготовки – Электроэнергетика и электротехника
Кафедра – Электропривода и электрооборудования

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

| Тема работы |
|--|
| «РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛОГО ДОМА НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И УПРАВЛЯЮЩЕГО КОНТРОЛЛЕРА SIEMENS LOGO!» |

УДК 62 – 83 – 523:621.67

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|---------------|---------|------|
| 5Г2Б | Михайлёв А.С. | | |

Руководитель

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|------------|---------------------------|---------|------|
| доцент | Гусев Н.В. | к.т.н., доцент | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|----------------|---------------------------|---------|------|
| доцент | Трофимова М.Н. | | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|-----------------|---------------------------|---------|------|
| доцент | Дашковский А.Г. | к.т.н., доцент | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Зав. кафедрой | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|----------------|---------------------------|---------|------|
| ЭПЭО | Дементьев Ю.Н. | к.т.н., доцент | | |

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт – Энергетический
 Направление подготовки – Электроэнергетика и электротехника
 Кафедра – Электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой

 (Подпись) (Дата) Дементьев Ю.Н.
 (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

| |
|---------------------|
| бакалаврской работы |
|---------------------|

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|------------------------------|
| 5Г2Б | Михайлёву Алексею Сергеевичу |

Тема работы:

| |
|---|
| «Разработка и исследование автоматизированной системы водоснабжения жилого дома на базе асинхронного электродвигателя и управляющего контроллера Siemens LOGO!» |
| Утверждена приказом директора (дата, номер) |

| | |
|--|--|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | |
|--|--|

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

| | |
|---|--|
| <p>Исходные данные к работе (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</p> | <p>Объект исследования – система управления асинхронным электроприводом насоса. Режим работы электропривода - непрерывный. Требование – обеспечить поддержание давления в водопроводной системе жилого дома на заданном уровне. Исходные данные к работе: - насос: производительность $Q=0,028$ м³/с, напор $H=45$ м, $\eta_{на}=0,68$; $\eta_n=1$; скорость вращения вала насоса $n_n=2450$ об/мин, плотность перекачиваемой жидкости $\rho=1000$ кг/ м³, коэффициент запаса принять равным 1,05; - в качестве управляющего контроллера принять Siemens LOGO!</p> |
| <p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p> | <p>Исследование технологического процесса автоматического поддержания давления воды в водопроводной системе; Описание насосов и особенностей их работы; Выбор оборудования; Расчет параметров и характеристик АД; Система автоматического управления электроприводом; Разработка функциональной схемы системы водоснабжения; Разработка алгоритма функционирования системы управления; Разработка и моделирование программного обеспечения контроллера.</p> |

| | |
|---|--|
| Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей) | Структурная схема АСУ ТП насосной станции; Алгоритм функционирования системы управления |
| Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов) | |
| Раздел | Консультант |
| Социальная ответственность | Дашковский А.Г. |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Трофимова М.Н. |

| | |
|---|--|
| Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику | |
|---|--|

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|-------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент | Гусев Н. В. | к.т.н., доцент | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|----------------------------|---------|------|
| 5Г2Б | Михайлёв Алексей Сергеевич | | |

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 101 с., 37 рис., 24 табл., 40 источников, 2 прил.

Ключевые слова: преобразователь частоты, насос, асинхронный электропривод, давление, скалярное управление, моделирование.

Объектом исследования является система управления асинхронного электропривода насоса.

Цель работы – исследование системы скалярного управления асинхронного электропривода насоса в системе водоснабжения многоэтажного жилого дома.

В процессе исследования проводился расчет и построение нагрузочной характеристики, а также статических естественных и искусственных характеристик двигателя при изменении частоты питающего напряжения. Разрабатывалась имитационная модель системы скалярного управления насоса в среде MATLAB.

В результате исследования имитационной модели были сняты характеристики переходных процессов при различных отклонениях давления в системе.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: надежность, энергосберегаемость, высокая эффективность, долговечность.

Область применения: в асинхронных электроприводах насосных станций.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в улучшении управления асинхронным электроприводом насосной станции, за счет плавного пуска асинхронного двигателя, отсутствия гидравлических ударов, снижение уровня шума при пуске и работе.

Содержание

| | |
|---|------------|
| Введение | 6 |
| 1. Технологический процесс автоматического поддержания давления воды в водопроводной системе..... | 8 |
| 1.1. Описание технологического процесса | 8 |
| 1.2. Основные сведения о насосных станциях | 11 |
| 1.3. Особенности эксплуатации станций | 12 |
| 1.4. Функции насосных станций..... | 13 |
| 2. Выбор оборудования | 16 |
| 2.1. Расчёт мощности двигателя, выбор двигателя и насосного агрегата | 16 |
| 2.2. Расчёт комплектующих преобразователя частоты | 19 |
| 2.3. Выбор преобразователя частоты | 30 |
| 2.4. Выбор и обоснование датчика давления | 34 |
| 2.5. Выбор контакторов и автоматов защиты..... | 36 |
| 2.6. Выбор источников питания..... | 38 |
| 2.7. Выбор кабелей..... | 38 |
| 2.8. Выбор клеммных зажимов..... | 39 |
| 2.9. Выбор и компоновка шкафа электроавтоматики | 39 |
| 2.10. Выбор и обоснование контроллера из линейки Siemens Logo | 41 |
| 3. Расчёт статических и динамических характеристик для разомкнутой системы регулируемого электропривода | 44 |
| 3.1. Расчёт естественных характеристик системы регулируемого электропривода..... | 44 |
| 3.2. Расчёт искусственных (регулирующих) характеристик системы регулируемого электропривода..... | 52 |
| 3.3. Расчет потерь в асинхронном двигателе при работе на искусственных характеристиках | 58 |
| 3.4. Расчет переходных процессов скорости и момента для режима пуска, наброса и сброса нагрузки на валу двигателя | 60 |
| 4. Система автоматического управления электропривода | 63 |
| 4.1. Разработка системы скалярного управления насоса в программной среде MatLab Simulink..... | 63 |
| 4.2. Разработка алгоритма функционирования системы управления | 71 |
| 4.3. Поэтапная реализация технологического процесса в программе Logo! Soft Comfort v7.0.... | 73 |
| 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..... | 75 |
| 5.1. Экспертная оценка | 76 |
| 5.2. Расчёт стоимости систем водоснабжения | 78 |
| 5.3. Расчёт величины экономии | 80 |
| 6. Социальная ответственность | 84 |
| 6.1. Анализ вредных факторов, которые может создать объект исследования | 84 |
| 6.2. Анализ опасных факторов, которые может создать объект исследования | 88 |
| 6.3. Охрана окружающей среды | 91 |
| 6.4. Защита в чрезвычайных ситуациях | 92 |
| 6.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности..... | 95 |
| Заключение | 97 |
| Список использованных источников | 99 |
| Приложение А | 103 |
| Приложение Б..... | 105 |

Введение

Энергосбережение (или рационализация производства, распределения и использования всех видов энергии) стало в последние годы одним из важнейших приоритетных направленностей технической политики во всех странах мира. Энергосбережение в любой области сводится к уменьшению бесполезных потерь. Анализ структуры потерь в сфере производства, распределения и потребления электроэнергии показывает, что определяющая потеря (до 90%) достаётся сфере потребления.

Электропривод, являясь энергосиловой основой современного производства, потребляет примерно 60% всей вырабатываемой электроэнергии, следовательно, важнейший эффект энергосбережения может быть получен в этой сфере. Большая часть электроэнергии потребляется электроприводами на основе всюду используемых асинхронных электродвигателей (АД) с короткозамкнутым ротором, для которых основным назначением энергосбережения является переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому. Это направление принято в мировой практике и динамично развивается, чему активно содействуют два совпавших во времени события: наметившийся дефицит энергоресурсов и ощутимый увеличение их стоимости и выдающиеся успехи силовой электроники и микроэлектроники.

Из спектра разнообразных решений, применяемых для энергосбережения, одно из наиболее эффективных и быстроокупаемых, требующих относительно низких капиталовложений – внедрение высокотехнологичной и наукоемкой энергосберегающей техники – частотно-регулируемых асинхронных приводов.

Центробежные вентиляторы, насосы и компрессоры объединяются в один класс нагрузочных устройств для электропривода, так как их характеристики, с точки зрения запросов и условий работы электропривода, имеют много общего.

Обычные способы регулирования подачи насосных и вентиляторных установок состоят в дросселировании напорных линий и изменении общего числа работающих агрегатов по одному из технологических параметров – давлению на коллекторе или в диктующей точке сети, уровню в приёмном или регулирующем резервуаре и др. Эти способы регулирования обращены на

решение технологических задач и практически не учитывают энергетических аспектов транспорта воды или газа.

Гидравлическое и электротехническое оборудование насосных и вентиляторных установок выбирается по наибольшим техническим параметрам (подаче, напору и др.). Всё же в реальной жизни оказывается, что вновь вводимые в эксплуатацию установки выходят на проектные режимы в течение нескольких лет. Поэтому имеющиеся станции нередко работают в режимах, отличающихся от расчётных. Кроме того, имеют место суточные, недельные и сезонные колебания расходов и напоров, обусловленные неустойчивым водопотреблением, в результате этого рабочие режимы насосов оказываются вне рабочих зон их характеристик.

С появлением надёжного регулируемого электропривода образовались предпосылки для разработки принципиально свежей технологии транспорта воды или газа с мягким регулированием рабочих параметров насосной или вентиляторной установок без непроизводительных расходов электроэнергии и с широкими возможностями повышения точности и эффективности технологических критериев работы систем подачи.

В настоящее время в приводах насосов, вентиляторов используются асинхронные двигатели, которые питаются от преобразователей частоты.

Дополнительно новая технология энергосбережения в вентиляторных установках с большой суммарной мощностью позволяет регулировать мощность в часы максимума нагрузки и тем самым сократить затраты на электроэнергию. При частотном регулировании насосов можно в значительной степени избежать аварийные ситуации за счёт предотвращения гидравлических ударов, возникающих при изменении режимов работы и пуске системы при нерегулируемом электроприводе. Поэтому проводимые работы по переводу механизмов на регулируемый электропривод являются актуальными.

1. Технологический процесс автоматического поддержания давления воды в водопроводной системе

1.1. Описание технологического процесса

Система водоподачи состоит из насоса 1, приводимого в движение электродвигателем 2. Насосы и двигатели размещены в здании насосной станции. Преобразователь частоты 3 управляет электродвигателем. Давление в водопроводной сети измеряется датчиком давления 4, сигнал обратной связи с которого поступает на ПЧ. Заданное значение давления устанавливается на пульте управления ПЧ. Схема технологического процесса представлена на рис.1.

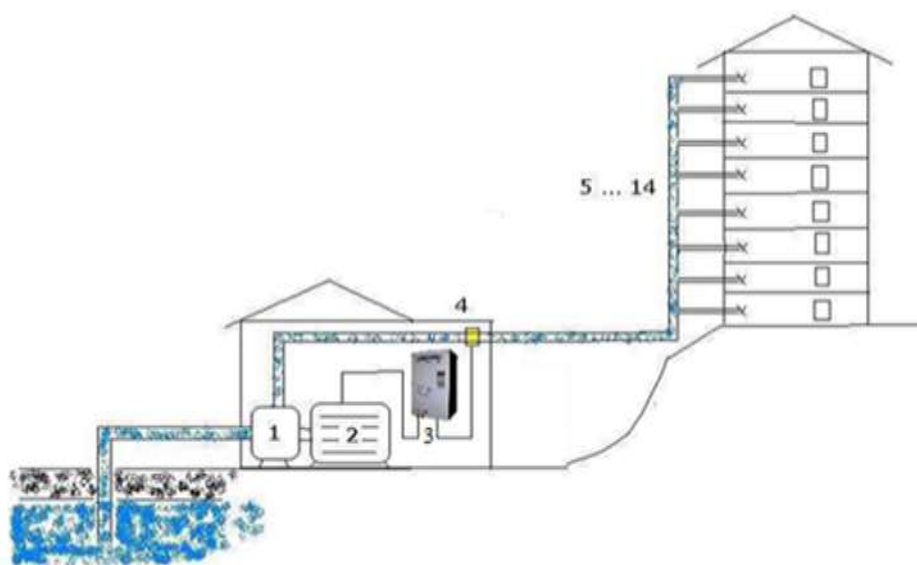


Рисунок 1 - Схема технологического процесса

В течение суток расход воды Q значительно изменяется (краны 5...14 открываются и закрываются). Максимальный (пиковый) расход воды приходится на утренние и вечерние часы, в то время как ночью расход практически нулевой и днем также небольшой. Если действующее давление воды в водопроводной сети при каком-то расходе отличается от заданного, то преобразователь частоты плавно изменяет скорость вращения двигателя и насоса так, чтобы при другом расходе (потреблении) обеспечить давление в сети.

Таким образом, независимо от величины p в кранах поддерживается постоянным. Преимущества использования ПЧ при поддержании заданного давления:

- снижение потребления электроэнергии,

- исключение гидроударов в сети и как следствие снижение количества аварий на трубопроводах,
- устранение ударных нагрузок на электрическую сеть при пуске электропривода.

Примерный суточный график водопотребления представлен на рис. 2

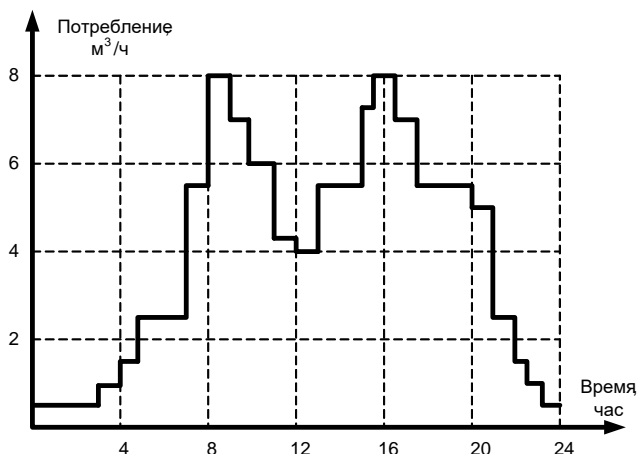


Рисунок 2 - График водопотребления

Плавное регулирование производительности применяется, как правило, только для одного из имеющихся в составе установки насосных агрегатов. При недостатке диапазона регулирования (например, мощность регулируемого двигателя увеличивается до максимальной, но это так и не приводит к нужному увеличению давления) происходит изменение числа включенных в работу насосных агрегатов (подключается дополнительный насосный агрегат, а мощность регулируемого – начинает вновь плавно увеличиваться).

Применение регулируемого асинхронного электропривода для управления насосными агрегатами может обеспечить:

- мягкий пуск электродвигателя, отсутствие механических нагрузок на двигатель и бросков тока в сети;
- отсутствие гидравлических ударов;
- рациональное использование потребляемой насосным агрегатом мощности во всем диапазоне регулирования;
- обеспечение коэффициента мощности двигателя насоса на значении, близком к 1;

- снижение величины шума при пуске и работе;
- обеспечение автономной и неопасной работы, интеграция в АСУ ТП.

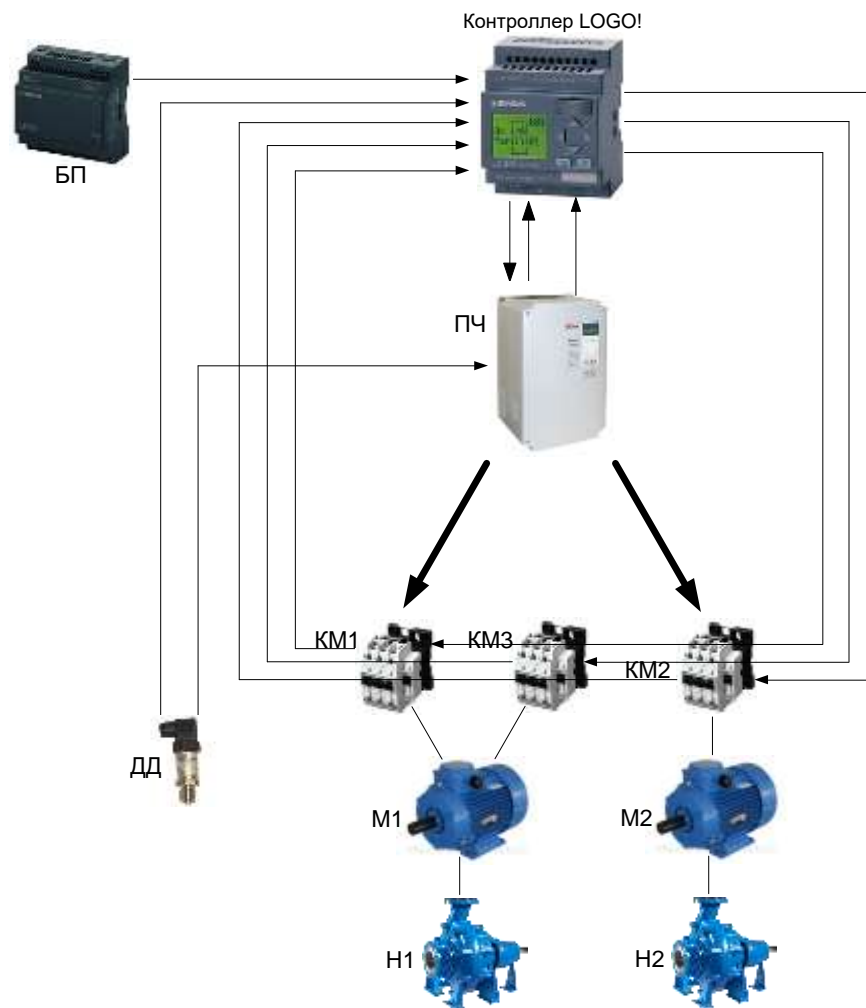


Рисунок 3 - Структурная схема АСУ ТП насосной станции

БП – Блок питания; ПЧ – Преобразователь частоты; КМ – Контактор; М – Двигатель; Н – Насос; ДД – Датчик давления.

По функциональному направлению управление технологическим процессом разделяется на три уровня:

1. Верхний уровень – автоматизированная рабочая точка оператора на базе пульта управления насосами (ПУН);

2. Средний уровень – обработка информации от измерительной системы нижнего уровня и создание управляющего сигнала для исполнительных приводов (в том числе исполнительных элементов автоматики);

3. Нижний уровень – исполнительный электропривод, входящий в промышленное оборудование.

На верхнем уровне система управления выполняет технологическое задание на движение рабочих органов отдельной технической установки или единой технологической системы.

Средний уровень обеспечивает программное движение исполнительных приводов, движение по траектории в пространстве управляемых переменных.

На нижнем уровне определяется технологическое оборудование, непосредственно участвующее в технологическом процессе, пространство управляемых и регулируемых переменных технологического оборудования.

1.2. Основные сведения о насосных станциях

Главными потребителями электроэнергии в нашей стране являются производственные предприятия и объекты ЖКХ. Значительная часть электроэнергии потребляется электроприводами насосов и вентиляторов. Цена электроэнергии в общей сумме эксплуатационных расходов на водопроводно-канализационных предприятиях в случае употребления поверхностных вод составляет 40–50%. Как показывает статистика, в процессе перекачки чистых и сточных вод нерационально расходуется 5–15% энергии. В отдельных случаях этот показатель повышается до 20–50%.

Насосным агрегатом именуется насос с электроприводом и передаточным механизмом. В совокупности с оборудованием, обеспечивающим его работу в требуемом режиме, он образует насосную установку. Сооружение, в состав которого входят одна или несколько насосных установок и вспомогательные системы, обеспечивающие работоспособность объекта в целом, называется насосной станцией.

Насосные водопроводные станции в зависимости от места, занимаемого в общей системе водоснабжения, подразделяют на станции 1-го, 2-го, 3-го и последующих подъемов и канализационные.

1.3. Особенности эксплуатации станций

Автономность работы. Автономная насосная станция не требует для обеспечения своей работы постоянного присутствия обслуживающего персонала. Его роль сводится к периодическим проверкам и профилактическим мероприятиям, призванным выявить и предупредить возможные неисправности в работе станции до момента их появления. Автоматическое управление насосными агрегатами также обеспечивает понижение числа аварийных ситуаций, вызванных влиянием человеческого фактора (например, невнимательностью или утомлением оператора).

Контроль и управление. Многие насосные станции расположены на достаточном удалении от заселенных пунктов и, соответственно, от диспетчерского поста. Поэтому остается нужда постоянного контроля их состояния, а также выходного параметра работы станции (выходного давления в трубопроводе или уровня воды в резервуаре). Кроме того, станция обязана обладать возможностью приема и выполнения команд оператора.

Защита насоса от работы в аварийных режимах. В условиях недостаточного входного давления насос входит в режим кавитации. Это вызывает резкое уменьшение ресурса и далее – разрушение поверхности рабочего колеса и корпуса насоса. При выходе рабочей точки насоса за пределы рабочей области может возникнуть явление, называемое помпажем. В этом случае вся система работает неустойчиво, периодически меняется нагрузка на насосном агрегате, возникают механические вибрации и удары.

Надежность работы. Насосная станция должна оставаться работоспособной даже при выходе из строя отдельных ее блоков. Для этого применяется резервирование и дублирование элементов станции. Структура станции организована таким образом, чтобы позволить соединять блоки станции в различных комбинациях и исключать неработоспособные блоки из работы.

Возможность ручного управления. Станция должна сохранять работоспособность в ручном режиме при полном выходе из строя автоматики. Оператор должен иметь возможность ручного управления насосными агрегатами

с кнопочного поста станции даже при полной неисправности системы управления. Возможна периодическая работа насосного агрегата при управлении в старт-стопном режиме на демпфирующее устройство, обеспечивающее поддержание требуемого технологического параметра. Оно будет компенсировать броски и провалы потока жидкости при пуске и остановке насоса. Классическим примером подобного регулирования является работа водонапорной башни. В связи с тем, что время работы электродвигателя существенно больше времени его пуска, можно считать, что КПД насоса близко к максимальному значению. С увеличением водопотребления частота включения-отключения агрегатов будет увеличиваться, так как объем жидкости в резервуаре расходуется быстрее.

Число включений-отключений насосных агрегатов при этом может достигать 40–50 в сутки. Для агрегатов большой мощности такое количество включений недопустимо, поэтому в насосных установках мощностью выше 150 кВт вместо этого применялось дросселирование потока воды задвижкой (устройством, которое за счет своего механического перемещения изменяет поперечное сечение). Такой метод приводит к гидроударам и износу трубопроводной части системы.

Для исключения этих явления применяют частотно-регулируемый электропривод. Его применение позволяет производить плавный разгон и остановку мощных насосных агрегатов, исключая появление гидроударов в трубопроводе при запуске в работу нового двигателя. Кроме того, он позволяет плавно регулировать производительность насоса и, следовательно, значение выходного напора насосной установки.

1.4. Функции насосных станций

Поддержание давления в трубопроводе. По сигналу от датчика давления, установленного в напорном трубопроводе, система управления автоматически изменяет частоту вращения рабочего колеса насоса, оперативно реагируя на изменение расхода жидкости и обеспечивая поддержание заданного давления с высокой точностью. Системой управления также производится подключение

дополнительного насосного агрегата при недостаточной производительности основного.

Поддержание уровня жидкости в аккумулирующем резервуаре.

По сигналам от датчиков уровня, расположенных в резервуаре, система управления изменяет приток или отток жидкости таким образом, чтобы уровень жидкости находился в заданном диапазоне.

Управление задвижкой. Система управления производит управление задвижкой для обеспечения необходимых условий запуска насосного агрегата. Запуск происходит на закрытую задвижку, после чего она открывается. Закрытие задвижки происходит после остановки насоса. Некоторые станции позволяют также регулировать выходное давление в трубопроводе изменением положения задвижки. Этот способ оказывается единственно возможным при выходе из строя преобразователя частоты.

Определение и исключение неисправных блоков. Если попытка запуска насосного агрегата с использованием ПЧ или УПП оказалась безуспешной, станция предпримет следующую попытку по истечении заданного времени. При исчерпании попыток перезапуска ПЧ или УПП будет сделана попытка запуска насоса напрямую от сети. Если и этот вариант не приведет к успешному запуску, насосному агрегату будет присвоен атрибут «аварийный», и он будет исключен из дальнейшей работы станции. Вместо него будет запущен следующий насосный агрегат. Подобным способом производится определение неисправности ПЧ или УПП и исключение их из работы станции. Аварийный останов станции произойдет только при полном отсутствии исправных насосных агрегатов.

Автоматический ввод резервного электропитания (ABP).

Питание станции производится от нескольких (обычно двух) независимых вводов напряжения питания. Непрерывно производится контроль напряжения обоих вводов. При пропадании напряжения на основном вводе система управления переводит станцию на питание от резервного ввода. При появлении на основном вводе напряжения и сохранении его в течение заданного времени станция возвращается при необходимости на питание от основного ввода.

Автоматическое чередование двигателей производится для равномерной выработки ресурса всех имеющихся в составе станции двигателей. При различной мощности двигателей обычно есть возможность устанавливать более сложный алгоритм переключения двигателей, чем простое чередование.

Работа по расписанию (график давления). Так называют автоматическое изменение уставки поддерживаемого параметра в зависимости от времени суток.

2. Выбор оборудования

2.1. Расчёт мощности двигателя, выбор двигателя и насосного агрегата

Исходные данные к работе представлены в табл. 1

Таблица 1 - Исходные данные

| Производительность, м ³ /с | Напор, м | Скорость вращения вала насоса, об/мин | КПД насоса | КПД передачи | Плотность перекачиваемой жидкости, кг/м ³ | Коэффициент запаса |
|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|------------|--------------|--|--------------------|
| 0,028 | 45 | 2450 | 0,68 | 1,0 | 1000 | 1,05 |

По формуле определяется необходимая расчетная мощность, для дальнейшего выбора двигателя:

$$P_{\text{дв}} = K_z \cdot P_{\text{нас}} = K_z \cdot \frac{Q \cdot P_n}{\eta_{\text{на}} \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3} = K_z \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_{\text{на}} \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 1,05 \cdot \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,028 \cdot 45}{0,68 \cdot 1} \cdot 10^{-3} = 19,08 \text{ кВт}$$

$$P_H \geq P_{\text{расч}} = 19,08 \text{ кВт}$$

где,

K_z – коэффициент запаса;

$P_{\text{нас}}$ – мощность насоса (гидравлическая), кВт;

P_n – давление на напоре насоса, Па;

$Q_{\text{на}}$ – производительность насоса, м³/с;

H – полный напор жидкости, м;

ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$\eta_{\text{на}}$ – КПД насоса;

η_n – КПД передачи;

Из каталога [25] выбран двигатель АИР 180 S2 имеющий параметры, представленные в табл.2

Таблица 2 – Технические характеристики выбранного двигателя АИР 180 S2

| Заданные величины | Условное обозначение | Единица измерения | Численное значение |
|---------------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------|
| Фазное напряжение | U_{ϕ} | В | 220 |
| Линейное напряжение | $U_{\text{л}}$ | В | 380 |
| Мощность двигателя | $P_{\text{дв.}}$ | Вт | 22000 |
| КПД | η_n | % | 91 |
| Синхронная частота вращения | n_c | об/мин | 3000 |
| Коэффициент мощности | $\cos \varphi_n$ | о.е. | 0,87 |
| Номинальное скольжение | S_n | % | 2,333 |
| Кратность пускового тока | k_i | о.е. | 7 |
| Кратность пускового момента | k_n | о.е. | 2,2 |
| Кратность максимального момента | k_{max} | о.е. | 2,9 |
| Кратность минимального момента | k_{min} | о.е. | 2 |
| Коэффициент загрузки двигателя | $P_{\text{жс}}$ | о.е. | 0,75 |
| Число пар полюсов | p | - | 1 |
| Частота питающей сети | f | Гц | 50 |
| Число фаз двигателя | m | - | 3 |
| Момент инерции ротора | J | $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ | 0,062 |

Технические данные двигателя основного исполнения, степень защиты IP 54, класс нагревостойкости изоляции «F».



Рисунок 4 – Внешний вид двигателя АИР 180 S2

Из каталога [17] выбирается насос, ЦМЛ 100/208-22/2 (рис.5), по номинальной мощности электродвигателя АИР 180 S2. Центробежный моноблочный насос ЦМЛ 100/208-22/2 имеет следующие параметры (табл.3):

Таблица 3 – Технические характеристики насоса ЦМЛ 100/208-22/2

| Тип насоса | Подача, м ³ / ч, | Напор, м | Макс. потребляемая мощность насоса, кВт | Частота вращения, (об / мин) |
|----------------------|--------------------------------|----------|--|------------------------------------|
| ЦМЛ 100/208- 22/2 | 100 | 50 | 22 | 2900 |



Рисунок 5 – Внешний вид насосного агрегата ЦМЛ 100/208-22/2

В центробежных насосах движение жидкости происходит под влиянием центробежных сил, возникающих при вращении жидкости лопатками рабочего колеса. Рабочее колесо с лопатками, насаженное на вал, вращается внутри корпуса. Жидкость, поступающая к центру колеса по всасывающему патрубку, вращается вместе с колесом, отбрасывается центробежной силой к периферии и выходит через нагнетательный патрубок (рис.6).

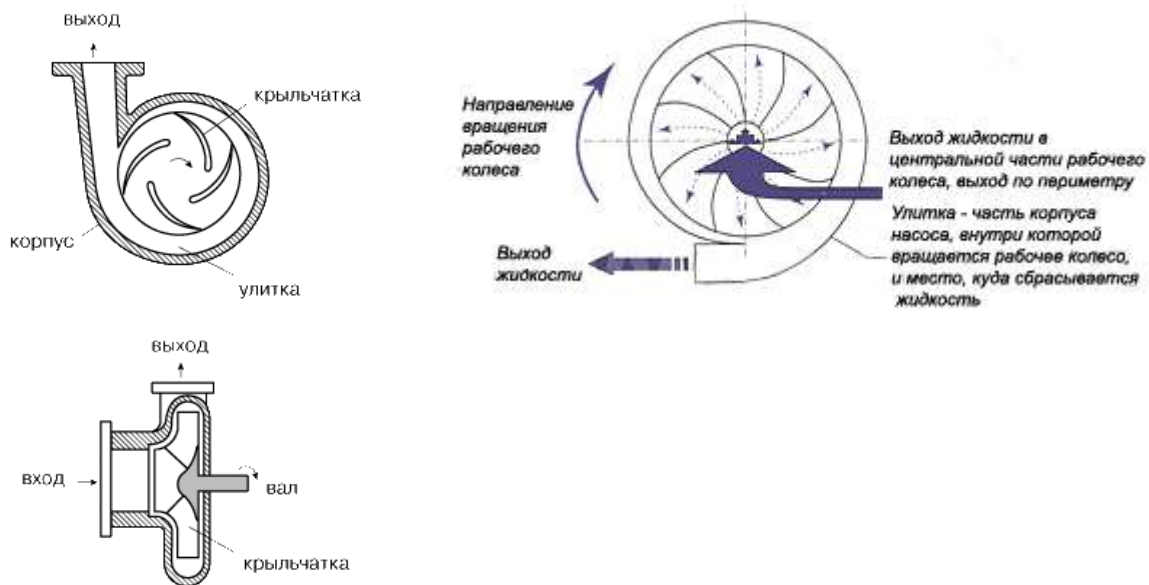


Рисунок 6 - Движение жидкости в центробежных насосах

Если для снабжения необходимой подачи или произведении требуемого напора одного насоса мало, применяют параллельное или последовательное объединение насосов.

Центробежные насосы обладают следующими преимуществами: маленькие габариты; сравнительно небольшая стоимость; отсутствие клапанов и деталей: с возвратно-поступательным движением; возможность прямого присоединения к быстроходным двигателям; плавное изменение подачи насоса с изменением гидравлического сопротивления трубы; возможность пуска насоса при закрытой задвижке на нагнетательной линии без угрозы порыва задвижки или трубопровода; возможность перекачки нефти; содержащих механические примеси; простота автоматизации насосных станций; оборудованных центробежными насосами.

2.2. Расчёт комплектующих преобразователя частоты

2.2.1. Расчет инвертора

Методика расчета приведена для преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения, реализованного с применением гибридных модулей, состоящих из ключей *IGBT* и обратных диодов *FWD*, смонтированных в одном корпусе на общей теплоотводящей пластине.

Максимальный ток через ключи инвертора определяется из выражения:

$$I_{c\max} = \frac{P_{\text{ном.}} \cdot k_1 \cdot \sqrt{2} \cdot k_2}{\eta_{\text{ном.}} \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}}} = \frac{22000 \cdot 1,2 \cdot 1,41 \cdot 1,1}{0,91 \cdot 0,87 \cdot 1,73 \cdot 380} = 78,815 \text{ A}$$

Где, $P_{\text{ном.}}$ — номинальная мощность двигателя, Вт;

k_1 — коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току [1,2 ÷ 1,5];

k_2 — коэффициент допустимой мгновенной пульсации тока [1,1 ÷ 1,2];

$\eta_{\text{ном.}}$ — номинальный КПД двигателя.

$U_{\text{л}}$ — линейное напряжение двигателя.

Питающее напряжение инвертора от выпрямителя:

$$U_d = k_{\text{с.н.}} \cdot U_{\text{л}} = 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ В}$$

Где, $k_{\text{с.н.}}$ - коэффициент схемы для номинальной нагрузки

Обратное напряжение IGBT модуля:

Обратное напряжение IGBT модуля необходимо делать с запасом и с учетом максимального отклонения напряжения в 15% от питающего напряжения инвертора, поэтому:

$$U_{\text{обр.}} = k_z \cdot k_{\text{откл.}} \cdot U_d = 2 \cdot 1,15 \cdot 513 = 1180 \text{ В}$$

Выбор модуля:

Выбор IGBT производится в соответствии с условием

$$I_c \geq I_{c\max};$$

$$U_{\text{кэ}} \geq U_{\text{обр.}}$$

Выбирается модуль FG40T120SMD производителя Fairchild Semiconductor

Характеристики модуля:

$$U_{\text{кэ}} = 1200 \text{ В} - \text{напряжение коллектор-эмиттер}$$

$$I_c = 80 \text{ А} - \text{ток коллектора}$$

$$U_{\text{ce.sat}} = 1,8 \text{ В} - \text{прямое падение IGBT в проводящем состоянии}$$

$$t_{\text{сOn}} = 40 \cdot 10^{-9} \text{ с} - \text{время открывания транзистора}$$

$$t_{\text{сOff}} = 475 \cdot 10^{-9} \text{ с} - \text{время закрывания транзистора}$$

$U_{cc} = 600 \text{ В}$ - коммутируемое напряжение равное напряжению звена

постоянного тока системы АИН-ШИМ

$f_{sw} = 2500 \text{ Гц}$ - частота коммутации ключей

$I_{rr} = 7,2 \text{ А}$ - амплитуда обратного тока через диод

$t_{rr} = 65 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ - продолжительность импульса обратного тока

$U_e = 4,8 \text{ В}$ – прямое падение напряжения на диоде

$R_{th(JC)q} = 0,27 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$ – термическое переходное сопротивление кристалл-

корпус для IGBT

$R_{th(JC)d} = 0,89 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$ – термическое переходное сопротивление кристалл-

корпус для диода

$R_{th(CF)} = 0,4 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$ – термическое сопротивление корпус-поверхность

теплопроводящей пластины модуля в расчете на одну пару диод/транзистор

Максимальная амплитуда тока на входе инвертора:

$$I_{cp.} = \frac{I_{c \max}}{k_1} = \frac{78,815}{1,2} = 65,679 \text{ А}$$

Потери IGBT в проводящем состоянии:

$$P_{SS} = I_{cp.} \cdot U_{ce.sat} \left(\frac{1}{8} + \frac{D \cdot \cos \theta}{3 \cdot \pi} \right) = 65,679 \cdot 1,8 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95 \cdot 0,87}{3 \cdot 3,14} \right) = 25,145 \text{ Вт}$$

Где,

D - скважность

$\cos \theta \approx \cos \varphi$ - коэффициент мощности

Потери IGBT при коммутации:

$$\begin{aligned} P_{sw} &= \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{(I_{cp.} \cdot U_{cc}) \cdot (t_{cOn} + t_{cOff}) \cdot f_{sw}}{2} = \\ &= \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{(65,679 \cdot 600) \cdot (4 + 47,5) \cdot 10^{-8} \cdot 2500}{2} = 5,71 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Суммарные потери:

$$P_Q = P_{SW} + P_{SS} = 25,145 + 5,71 = 30,855 \text{ Вт}$$

Потери диода в проводящем состоянии:

$$P_{DS} = I_{ep} \cdot U_e \cdot \left(\frac{D \cdot \cos \theta}{3 \cdot \pi} + \frac{1}{8} \right) = 4,207 \cdot 1,9 \cdot \left(\frac{0,95 \cdot 0,87}{3 \cdot 3,14} + \frac{1}{8} \right) = 1,7 \text{ Вт}$$

Где, $I_{ep} \approx I_{cp}$ - максимальная амплитуда тока через диод

Потери при восстановлении запирающих свойств:

$$P_{DR} = \frac{1}{8} (I_{rr} \cdot U_{cc} \cdot t_{rr} \cdot f_{SW}) = \frac{1}{8} (7,2 + 600 + 0,65 \cdot 10^{-7} \cdot 2500) = 0,088 \text{ Вт}$$

Суммарные потери диода

$$P_D = P_{DR} + P_{DS} = 0,088 + 67,054 = 67,141 \text{ Вт}$$

$$P_T = P_D + P_Q = 67,141 + 30,855 = 97,996 \text{ Вт}$$

Тепловой расчет. Температура кристалла IGBT.

$$T_{ja} = T_c + P_Q \cdot R_{th(JC)q} = 110 + 30,855 \cdot 0,89 = 118,331 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Где,

$$T_c = 110 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ - температура теплопроводящей пластины [90 ÷ 110]}$$

$$T_a = 50 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ - температура охлаждающей пластины [25 ÷ 50]}$$

Температура кристалла обратного диода:

$$T_{jd} = T_c + P_D \cdot R_{thJCq} = 110 + 67,141 \cdot 0,89 = 169,756 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Проверка теплового режима работы кристаллов:

$$T_{ja} < 175^\circ\text{C}$$

$$T_{jd} < 175^\circ\text{C}$$

Тепловой режим работы соблюдается.

Максимальное допустимое переходное сопротивление охладитель окружающая среда в расчете на инвертор:

$$R_{thFAi} = \frac{T_c - T_a}{P_T} - R_{thCF} = \frac{110 - 25}{97,996} - 0,4 = 0,467 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$$

2.2.2. Расчет выпрямителя

Максимальное значение среднего выпрямленного тока:

$$I_{dm} = \frac{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{I_{c \max}}{\sqrt{2}} \right) \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos \varphi + n \cdot P_T}{U_d} = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{78,815}{\sqrt{2}} \cdot 380 \cdot 0,87 + 6 \cdot 97,996}{513} = 63,353 A$$

Где

n – Количество пар транзистор/диод в инверторе

Максимальный рабочий ток диода:

$$I_{vm} = k_{cc} \cdot I_{dm} = 1,045 \cdot 63,353 = 66,204 A$$

Где

k_{cc} - коэффициент для мостовой трехфазной схемы при оптимальных параметрах Г-образного LC фильтра

Максимальное обратное напряжение диода:

$$U_{vm} = k_{\text{з.н.}} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{л}} \cdot k_{\text{с.н.}} \cdot k_c + \Delta U_n = 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1,35 \cdot 1,1 + 125 = 1043 B$$

Где

$k_{\text{з.н.}}$ - коэффициент запаса по напряжению [$\geq 1,15$]

k_c - коэффициент допустимого повышения напряжения [$\geq 1,1$]

ΔU_n - запас на коммутационные выбросы напряжения в звене постоянного тока [100 ÷ 150 В]

Выбор модуля:

Выбор выпрямителя производится в соответствии с условием

$$U_j > \frac{U_{vm}}{100}$$

$$I_{np.} > I_{vm}$$

Выбирается трехфазный мостовой выпрямитель 78-VS-70MT160P-P производителя Vishay Semiconductors.

Характеристики:

$I_{np.} = 75 A$ - максимальный рабочий ток диода.

$U_j = 1,45 В$ - прямое падение напряжения.

$R_{on} = 9,5 \cdot 10^{-3} Ом$ - динамическое сопротивление полупроводникового прибора в проводящем состоянии.

$R_{th(CF)v} = 0,1 \frac{°C}{Вт}$ - термическое сопротивление корпус-поверхность теплопроводящей пластины.

$R_{th(JC)dv} = 0,23 \frac{°C}{Вт}$ - термическое переходное сопротивление кристалл-корпус.

Расчет потерь в выпрямителе для установившегося режима работы:

$$P_{DV} = m_v \cdot k_{cs} \cdot \left(U_j + R_{on} \cdot \frac{I_{dm}}{k_1} \right) \cdot \frac{I_{dm}}{k_1} = 6 \cdot 0,577 \cdot \left(1,45 + 9,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{63,353}{1,2} \right) \cdot \frac{63,353}{1,2} = 352,363 Вт$$

Где,

m_v - число полупроводниковых приборов в схеме

k_{cs} - коэффициент для трехфазной мостовой схемы

Температура кристалла:

$$T_{jDV} = T_c + \frac{P_{DV}}{n_D} \cdot R_{th(JC)dv} = 110 + \frac{352,363}{6} \cdot 0,23 = 123,507 °C$$

Проверка теплового режима работы кристалла:

$$T_{jDV} < 175 °C$$

Максимально допустимое переходное сопротивление охладитель-окружающая среда в расчете на выпрямитель

$$R_{th(FA)v} = \frac{T_c - T_a}{P_{DV}} - R_{th(CF)v} = \frac{110 - 25}{352,363} - 0,1 = 0,141 \frac{°C}{Вт}$$

2.2.3. Расчет параметров охладителя

Предварительно определяется суммарное переходное тепловое сопротивление охладитель-окружающая среда в расчете на суммарную мощность, т.е. с учетом всех модулей.

$$R_{th(FA)p} = \frac{R_{th(FA)i} \cdot R_{th(FA)v}}{R_{th(FA)i} + R_{th(FA)v}} = \frac{0,467 \cdot 0,141}{0,467 + 0,141} = 0,108 \frac{^{\circ}C}{Bm}$$

Площадь охладителя участвующая в конвекции (Рисунок 7)

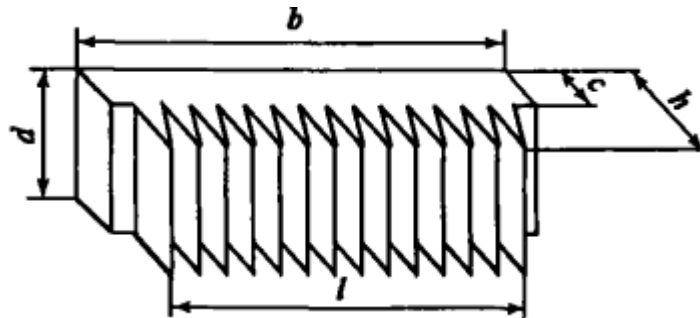


Рисунок 7 - Охладитель

Предварительно принимается:

$m = 400$ - число ребер охладителя

$d = 0,15$ м - длина

$b = 0,1$ м - ширина

$h = 0,1$ м - высота

$c = 0,0001$ м - высота, не участвующая в конвекции

$$A_{conv.} = 2 \cdot d \cdot (b + m \cdot (h - c)) = 2 \cdot 0,15 \cdot (0,1 + 400 \cdot (0,1 - 0,0001)) = 12,018 \text{ м}^2$$

Площадь охладителя, участвующая в излучении тепла:

$$A_{rad.} = 2 \cdot d \cdot (b + h) = 2 \cdot 0,15 \cdot (0,1 + 0,1) = 0,06 \text{ м}^2$$

Переходное сопротивление излучения тепла:

$$R_{Qrad} = \frac{T_{cK} - T_{aK}}{5,1 \cdot E \cdot A_{rad.} \cdot \left[\left(\frac{T_{cK}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{aK}}{100} \right)^4 \right]} = \frac{383,15 - 298,15}{5,1 \cdot 0,8 \cdot 0,06 \cdot \left[\left(\frac{383,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{298,15}{100} \right)^4 \right]} = 2,544 \frac{^{\circ}C}{Bm}$$

где

$T_{cK} = T_c + 273,15$ - температура теплопроводящей пластины в Кельвинах

$T_{aK} = T_a + 273,15$ - температура охлаждающей пластины в Кельвинах

E - коэффициент излучения с поверхности тепла для алюминия

Переходное температурное сопротивление теплопередачи конвекцией:

$$R_{Qconv} = \frac{1}{1,34 \cdot A_{conv.} \cdot F_{red.}} \cdot \left(\frac{d}{T_{cK} - T_{aK}} \right)^{0,25} =$$

$$= \frac{1}{1,34 \cdot 12,018 \cdot 0,9} \cdot \left(\frac{0,1}{383,15 - 298,15} \right)^{0,25} = 0,014 \frac{^{\circ}C}{Bm}$$

Где

$F_{red.}$ - коэффициент ухудшения теплоотдачи (для расстояния между рёбрами <5мм)

Переходное температурное сопротивление охладитель-окружающая среда при естественном охлаждении.

$$R_{th(FA)} = \frac{R_{Qrad} \cdot R_{Qconv}}{R_{Qrad} + R_{Qconv}} = \frac{2,544 \cdot 0,014}{2,544 + 0,014} = 0,014 \frac{^{\circ}C}{Bm}$$

Проверка параметров охладителя:

$$R_{th(FA)p} > R_{th(FA)}$$

$$0,108 \frac{^{\circ}C}{Bm} > 0,014 \frac{^{\circ}C}{Bm}$$

Температурное сопротивление охладителя меньше расчетного значения, следовательно, габаритные размеры охладителя подобраны, верно.

2.2.4. Расчет фильтра

Коэффициент пульсаций на входе фильтра:

$$q_{1ex} = \frac{2}{m_p^2 - 1} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057$$

Где

m_p - пульсность схемы

Коэффициент сглаживания по первой гармонике:

$$S = \frac{q_{1ex}}{q_{1bix}} = \frac{0,057}{0,004762} = 12$$

Где

q_{16bx} - коэффициент пульсаций на выходе фильтра, выбирается таким образом, что бы значение S лежало в пределах $[3 \div 12]$ где 12 – максимальное сглаживание.

Индуктивность дросселя LC фильтра:

$$L_{0\min} = \frac{0,013 \cdot U_{\text{л}}}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot I_{dm}} = \frac{0,013 \cdot 380}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 63,353} = 2,482 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$$

Где

f_c - частота питающей сети

Для обеспечения коэффициента мощности на входе выпрямителя $K_m = 0,95$ должно соблюдаться условие:

$$L_0 \geq 3 \cdot L_{0\min}$$

$$3 \cdot L_{0\min} = 7,446 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$$

Принимаем:

$$L_0 = 0,001 \text{ Гн}$$

Емкость конденсатора LC фильтра определяется из выражения:

$$C_0 = \frac{S + 1}{(2 \cdot \pi \cdot m_p \cdot f_c)^2 \cdot L_0} = \frac{12 + 1}{(2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 50)^2 \cdot 0,001} = 3,659 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$$

Емкость конденсатора необходимая для протекания реактивного тока нагрузки инвертора, находится из выражения:

$$C_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{sm1} \cdot \left(\sin \left(\frac{\varphi_1}{2} - \frac{\pi}{12} \right)^2 \right)}{2 \cdot U_d \cdot f_{SW} \cdot q_{16bx.}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 42,103 \cdot \left(\sin \left(\frac{29,541}{2} - \frac{\pi}{12} \right)^2 \right)}{2 \cdot 513 \cdot 2500 \cdot 4,762 \cdot 10^{-3}} = 5,183 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$$

Где

$$I_{sm1} = \frac{P_{ном.}}{m_f \cdot \eta_{ном.} \cdot \cos \varphi \cdot U_{\phi}} = \frac{22000}{3 \cdot 0,91 \cdot 0,87 \cdot 220} = 42,103 \text{ А} \quad - \quad \text{амплитудное}$$

значение тока в фазе двигателя

$$\varphi_1 = \arccos(\cos \varphi) = 29,541^\circ$$

m_f - число фаз двигателя

Для практической реализации фильтра используют конденсаторы с наибольшей емкостью, поэтому далее в расчете используется C_1 .

Амплитуда тока протекающего через конденсатор фильтра на частоте пульсаций выпрямленного тока

$$I_{C0m} = q_{1вых} \cdot U_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot m_p \cdot f_c \cdot C_1 = 4,762 \cdot 10^{-3} \cdot 513 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 50 \cdot 5,183 \cdot 10^{-3} = 23,865 \text{ A}$$

Далее формируется батарея конденсаторов с параметрами:

$$I_{C0} \geq 23,86 \text{ A}$$

$$C \geq 1200 \text{ мкФ}$$

$$U_{н.дс} \geq 800 \text{ В}$$

Выбираем конденсатор 3186BH751T450APA1 производителя Cornell Dubilier

Характеристики:

$$C = 750 \text{ мкФ}$$

$$U_{н.дс} = 450 \text{ В}$$

Для повышения рабочего напряжения включается параллельно 2 конденсатора данной фирмы.

2.2.5. Расчет снаббера

Что бы минимизировать перенапряжение и предотвратить аварию IGBT, требуется установка снаббера (демпфирующей цепи). Целесообразно выбрать схемы с последовательным соединением конденсатора и резистора, так как она имеет малое число элементов, и малые токи пульсации через конденсатор.

Выбирается конденсатор К78-2 с хорошими высокочастотными характеристиками, малой собственной индуктивностью, высокими допустимыми токами и малыми потерями.

Характеристики:

$$C = 0,15 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$U = 1000 \text{ В}$$

Мощность резистора рассчитывается по формуле:

$$P = 0,5 \cdot C \cdot \Delta U^2 \cdot f_{sw} = 0,5 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 60^2 \cdot 2500 = 0,675 \text{ Вт}$$

Где

$\Delta U = 60 \text{ В}$ - перенапряжение (принимается максимальное значение, так как не может выражено математически)

Выбор сопротивления резистора:

$L_{sn} = 10 \cdot 10^{-9}$ - индуктивность цепей снаббера (должна быть такой или меньше)

$$R_n = 2 \cdot \sqrt{\frac{L_{sn}}{C}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot 10^{-9}}{0,15 \cdot 10^{-6}}} = 0,516 \text{ Ом}$$

Выбираем резистор WSR2R5200FEA производителя Vishay / Dale

Характеристики:

$R = 0,52 \text{ Ом}$ - Сопротивление

$P = 2 \text{ Вт}$ - номинальная мощность

2.3. Выбор преобразователя частоты

С точки зрения энергетики главным параметром электропривода является его мощность. Поэтому при выборе преобразователя частоты в первую очередь нужно определить требования к его нагрузочной способности. Вторым значительным параметром преобразователя являются требования к напряжению питающей сети. Как правило, преобразователи питаются от трехфазной сети переменного тока напряжением 380 В, разброс $+10\%$ / -15% , что полностью соответствует требованиям российских стандартов к качеству электроснабжения.

В наше время существует крупное количество различных преобразователей частоты. Ведущие позиции среди них занимают преобразователи таких фирм, как «ВЕСПЕР», «Siemens», «ABB», «Danfoss», «Omron», «Mitsubishi», «Schneider Electric», «Delta Electronics».

Выбираем ПЧ фирмы «ВЕСПЕР» (рис.8) при условии что $I_{н\text{ ПЧ}} \geq 1,25 I_{н\text{ ДВ}}$
 $P_{н\text{ ПЧ}} \geq 1,25 P_{н\text{ ДВ}}$

Насосный преобразователь частоты EI-P7012-030H [18]



Рисунок 8 - Преобразователь частоты

Модель новейшего поколения преобразователей частоты насосной серии. Применяется для управления приводами с переменной нагрузкой насосного типа. Свежую модель выгодно отличают расширенные функциональные возможности, минимальные массогабаритные характеристики, увеличенный диапазон мощностей.

- Диапазон мощностей $7,5\text{ кВт} - 370\text{ кВт}$.
- Возможность управления группой электродвигателей от одного преобразователя.

- Встроенный ПИД-регулятор. Управление по вольт-частотной характеристике U/F .

- Аналоговые и цифровые входы/выходы для регулирования и дистанционного управления.

- Управление и диагностика по линии *RS-485/RS-232*.

- Питание *380 В, 50 Гц*.

Специальная серия преобразователей разработана для управления устройствами, предназначенными для транспортировки жидкостей и газов. Эти механизмы подразделяются на три группы:

- насосы;
- вентиляторы;
- компрессоры.

Преобразователи серии *EI-P7012* ориентированы на наиболее распространенную в настоящее время группу насосов, вентиляторов и компрессоров центробежного типа, которые имеют так называемую вентиляторную нагрузку. Отличительными особенностями преобразователей этой серии, которые определены типом нагрузки, являются:

- скалярное управление с фиксированным соотношением между напряжением питания и частотой питающего напряжения (U/f);
- отсутствие встроенных и дополнительных тормозных устройств;
- пониженная перегрузочная способность по моменту в пределах 15% - 20%.

Некоторое упрощение функций преобразователя позволило снизить стоимость, упростить обслуживание и предложить его для массового внедрения на многих объектах в различных отраслях.

Преобразователи серии *EI-P7012* рекомендуется применять для регулирования подачи и поддержания заданного напора жидкости, давления или разрежения газа, температуры газа и т.п. на нефте- и газоперекачивающих станциях, насосных водопроводных станциях, в котельных, на станциях водоочистки, в центральных тепловых пунктах, в установках главного

проветривания шахт и т.п. Применение *EI-P7012* позволяет существенно уменьшить потребление электроэнергии и энергоресурсов, продлить срок службы оборудования, упростить техническое обслуживание, снизить число аварийных ситуаций.

При решении перечисленных задач преобразователь может работать как в ручном, так и в автоматическом режиме. В обоих режимах предусмотрено местное или дистанционное управление.

В ручном режиме управление осуществляется оператором с местного или дистанционного пульта без обратной связи. Для удобства пользователя в преобразователе имеется возможность подключения внешнего задающего аналогового устройства – потенциометра. Слежение за параметрами рабочего процесса (подача, напор, давление, разряжение) совершается оператором по измерительным приборам. Точность поддержания скорости в ручном режиме составляет $\pm 2\% - 3\%$. Диапазон управления скоростью равен 1:20.

Предпочтительнее с точки зрения качества управления параметрами рабочего процесса использовать автоматический режим с обратной связью по регулируемому параметру. Для измерения параметров процесса можно использовать все популярные датчики физических величин аналогового типа. Выходной токовый сигнал датчика может быть от 4 мА до 20 мА, сигнал по напряжению – от 0В до 10В. При совместном соглашении преобразователи могут поставляться компанией в наборе с датчиками.

В автоматическом режиме с обратной связью в преобразователе реализуется ПИД-закон регулирования. Для оперативной настройки параметров регулятора под требуемый технологический процесс Вы имеете возможность управлять коэффициентами обратной связи. Использование ПИД-регулятора позволяет поддерживать заданные параметры практически без ошибки. При выборе ЧП для мощных вентиляторов, дымососов, компрессоров с большими инерционными массами необходимо обратить внимание на возможность ограничения пусковых токов. Ограничение пусковых токов требуется также для исключения гидроударов в трубопроводах. В преобразователе для исключения

ударных нагрузок на двигатель и механическую долю привода имеется функция мягкого пуска. Можно выставить время разгона или торможения электродвигателя автономно друг от друга в пределах от 0,1 с до 3600 с.

Важное значение для электропривода в целом имеет тип защиты от аварийных режимов. Преобразователь EI-P7012 обеспечивает полную защиту электродвигателя. EI-P7012 имеют два типоразмера - IP20 и IP54.

Проверка адекватности выбора ПЧ из следующих условий:

- Рассчитывается полная пусковая мощность ПЧ:

$$\left[\frac{k \cdot n}{9550 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \cdot \left(M_{ст} + \frac{J}{9,55} \cdot \frac{n}{t_A} \right) \right] \leq 1,5 \cdot P_{н.пч.}$$

$$\left[\frac{0,95 \cdot 2940}{9,55 \cdot 0,9 \cdot 0,9} \cdot \left(71,463 + \frac{0,062}{9,55} \cdot \frac{2940}{10} \right) \right] = 26,492 \leq 1,5 \cdot 30$$

$$26,492 \text{ кВА} \leq 45 \text{ кВА}$$

где k – коэффициент искажения тока, связанный с алгоритмом формирования синусоиды тока с помощью ШИМ (широтно-импульсной модуляции напряжения на двигателе). Этот коэффициент может принимать значения от 0,95 до 1,05 и не имеет размерности. В первом приближении можно принять его равным 1;

t_A – время, сек, в течение которого требуется разогнать двигатель до частоты вращения;

$M_{ст}$ – статический момент нагрузки на валу двигателя, Н·м, чаще всего это номинальный момент двигателя, взятый из спецификации на двигатель.

- Рассчитывается ток $I_{потр}$, который потребляет двигатель при работе от преобразователя частоты при напряжении U сети 220/380В:

$$I_{потр} = \frac{k \cdot n \cdot M_{ст}}{9,55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,95 \cdot 2940 \cdot 71,463}{9,55 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 380 \cdot \sqrt{3}} = 39,203 \text{ А} < 48 \text{ А},$$

где M – момент нагрузки на валу двигателя, Н·м, чаще всего это номинальный момент двигателя, взятый из спецификации на двигатель;

U – линейное напряжение (действующее значение) на обмотках двигателя, В.

- Рассчитывается ток $I_{\text{ПОТР.Р.}}$, который потребляет двигатель при линейном разгоне:

$$I_{\text{ПОТР.Р.}} = \frac{k \cdot n}{9,55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot \sqrt{3}} \cdot (M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}})$$

$$I_{\text{ПОТР.Р.}} = \frac{0,95 \cdot 2940}{9,55 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 380 \cdot \sqrt{3}} \cdot (71,463 + 1,909) = 40,25 \text{ A} < 48 \text{ A},$$

$$M_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 9,55}{n} = \frac{22 \cdot 9,55}{2940} = 71,463 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{дин}} = \frac{J}{9,55} \cdot \frac{n}{t} = \frac{0,062}{9,55} \cdot \frac{2940}{10} = 1,909 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $M_{\text{ст}}$ – статический момент нагрузки на валу двигателя, $\text{Н} \cdot \text{м}$, чаще всего это номинальный момент двигателя, взятый из спецификации на двигатель;

$M_{\text{дин}}$ – динамический момент нагрузки, возникающий при разгоне инерционной нагрузки, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

- Рассчитывается полная потребляемая двигателем мощность в номинальном установившемся режиме

$$S_{\text{ПОТР}} = \frac{k \cdot P}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{0,95 \cdot 22}{0,9 \cdot 0,9} = 25,802 \text{ кВА} < 30 \text{ кВА},$$

где P – номинальная мощность двигателя, кВт .

Из получившихся условий можно сделать вывод, что ПЧ выбран правильно.

2.4. Выбор и обоснование датчика давления

Устройства получения информации о состоянии технологического процесса предназначены для сбора и преобразования информации без изменения ее содержания о контролируемых и управляемых параметрах ТП. Входом устройств являются естественные или унифицированные сигналы, выходом – соответствующие значения унифицированных сигналов.

К устройствам для получения информации о состоянии процесса, образующим канал сбора и преобразования информации, причисляют чувствительные элементы или собственно датчики.

Датчики физических величин воспринимают контролируемый параметр и преобразуют его в величину, удобную для передачи по каналам связи или дальнейшего преобразования.

Основными характеристиками измерительных устройств для получения информации о состоянии ТП являются: входная величина, воспринимаемая и преобразуемая датчиком; выходная величина, используемая для передачи информации; статическая и динамическая характеристики датчика; порог чувствительности; основная и дополнительные погрешности.

В данном ТП в качестве измерительного механизма используется датчик давления подачи воды (ДД).

Входная величина Q , поступающая на вход датчика ДД, относится к классу входных величин датчика, характеризующих протекание процесса. Выходная величина, используемая для передачи информации, моделируется по амплитуде. Динамическая характеристика датчика определяет поведение датчика при изменении входной величины и определяется внутренней структурой датчика и его элементов.

Точность измерений давления воды характеризуют следующие факторы:

- порог восприимчивости датчика – минимальное изменение входной величины, вызывающее изменение выходного сигнала;
- главная погрешность датчика – максимальная разность между получаемой в нормальных эксплуатационных ситуациях величиной выходного сигнала и его номинальным значением, устанавливаемая по статической характеристике для данной входной величины;
- добавочные погрешности датчика – погрешности, вызываемые изменениями наружных условий по сравнению с нормальными условиями (температурная погрешность и др.).

Датчики, обеспечивающие управление технологическими переменными и управляющими воздействиями:

В комплект поставки преобразователя частоты входит датчик давления ОТ-1 (МН-2) представленный на рис.9.



Рисунок 9 - Датчик давления

Технические характеристики датчика давления ОТ-1 (МН-2) представлены в табл.4

Таблица 4 - Технические характеристики датчика давления ОТ-1 (МН-2)

| Название | ОТ-1 (МН-2) |
|---|---|
| Тип | Тензорезистивный |
| Диапазоны давления | 0...6, 0...10, 0...16, 0...25 бар |
| Погрешность | 1 % |
| Выходной сигнал | 4-20 мА (двухпроводное подключение) |
| Питание | 10...30 В постоянного тока |
| Присоединение | G1/4 |
| $T_{раб}$ измеряемой среды | -40 °С...+125 °С |
| $T_{раб}$ окружающей среды | -40 °С...+100 °С |
| Защита от ударных нагрузок | 500g (механический удар) |
| Защита от вибрации | 20g (вибрация в условиях резонанса) |
| Материалы, контактирующие с измеряемой средой | Нержавеющая сталь с добавками <i>CrNi</i> |
| Пылевлагозащита | IP67 |
| Масса | 70 |

2.5. Выбор контакторов и автоматов защиты

По номинальному току и мощности был выбран контактор [19] фирмы Danfoss серии CI 45 (рис. 10), технические характеристики которого находятся в табл.5.



Рисунок 10 - Контактор CI 45

Таблица 5 – Технические характеристики контактора Danfoss серии CI 45

| Характеристики | Величина |
|--|----------|
| Тип | CI 45 |
| АС-1 нагрузочный, I_{th} , открытый | 80 А |
| АС-1 нагрузочный, I_{th} , закрытый | 80 А |
| АС-3 нагрузочный, I_e | 45 А |
| АС-3 силовой, U_e , 380 – 500В | 22 кВт |
| Главные контакты | 3 |
| Максимальное количество навесных вспомогательных контактов | 4 |

Также был выбран автоматический выключатель [20], который предназначен для защиты проводов, кабелей, электрооборудования от короткого замыкания и перегрузок. Для этого было выполнено следующее:

$$1. I_{расц} \geq I_{дл}, I_{дл} \geq I_{н.ЭД} = 39,203 \text{ А} ;$$

$$2. I_{кз} \geq 1,5 \cdot I_{пуск} \text{ (для одного ЭП);}$$

$$I_{кз} \geq 1,5 \cdot I_{кр} = 1,5 \cdot 267,682 = 401,523 \text{ А},$$

$$I_{кр} = I_n = 267,682 \text{ А} - \text{пусковой ток.}$$

Выбран автоматический выключатель типа ВА14-26 (рис. 11) с $I_{ном} = 64 \text{ А}$, $I_{н.расц.} = 50 \text{ А}$, $I_{кз} = 10 \cdot I_{н.расц} = 10 \cdot 50 = 500 \text{ А}$.



Рисунок 11 – Автоматический выключатель ВА 14-26

Выбор плавких предохранителей:

Выбраны плавкие предохранители исходя из условий:

$$I_{BC} \geq I_{н.ЭД}$$

$$I_{BC} \geq I_{н.ЭД}$$

Выбран предохранитель типа ПН2-100 с параметрами, приведенными в табл. 6

Таблица 6 – Параметры предохранителя типа ПН2-100

| Тип | $I_{\text{ном}}, \text{А}$ | |
|---------|----------------------------|-----------------|
| | Предохранителя | Плавкой вставки |
| ПН2-100 | 100 | 40 |

2.6. Выбор источников питания

Для питания логического модуля совместно с модулем расширения выбираем блок питания фирмы Siemens серии LOGO! Power =24В/ 4А, 90 Вт *6EP1332-1SH51* (рис.12).



Рисунок 12 - Блок питания LOGO! Power =24В/4А

Технические данные блока питания LOGO! Power 24В/4А приведены в приложении А.

2.7. Выбор кабелей

Соединение оборудования в шкафах производится одножильным проводом марки ПВ-1, имеющим однопроволочную и многопроволочную медную жилу с поливинилхлоридной изоляцией различного цвета. Выбирается провод с однопроволочной жилой сечением $1,5 \text{ мм}^2$ для подключения оборудования цепи управления; провод сечением $2,5 \text{ мм}^2$, для подключения преобразователя частоты и контакторов. Для питания преобразователей частоты и электродвигателей (а также насосов) выбран по условию $I_{\text{каб}} \geq I_{\text{доп}}$; $42 \geq 40$ силовой кабель ВВГнг 5х25

2.8. Выбор клеммных зажимов

Клеммники широко применяются как в бытовой электропроводке, так и в промышленном монтаже в местах, требующих повышенной надежности и виброустойчивости. В данной работе выбраны клеммники фирмы «WAGO» (Германия). Фирма «WAGO» – мировой лидер в производстве клемм и разъемов, с использованием пружинной технологии соединения. В настоящее время на российском рынке присутствует широкая номенклатура продукции «WAGO».

Выбраны клеммы для установки на DIN-рельс с зажимом CAGE CLAMP фирмы WAGO (рис.13) с боковым подключением:

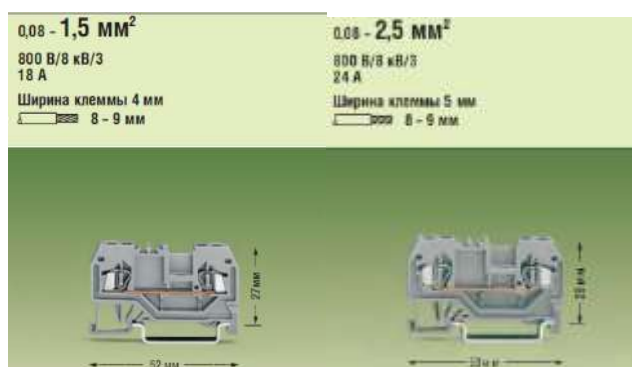


Рисунок 13 - Клемма фирмы WAGO

2.9. Выбор и компоновка шкафа электроавтоматики

Перечень блоков компоновки шкафа приведены в табл.7

Таблица 7 - Перечень блоков компоновки шкафа

| Обозначение | Расшифровка |
|-------------|--|
| ПЧ | Преобразователь частоты |
| БПМК | Блок питания LOGO!POWER |
| МК | Базовый модуль LOGO!Basic |
| QF1 – QF3 | Автоматический выключатель 175x112,5x112,5 |
| K1 | Контактор 1 |
| K2 | Контактор 2 |
| K3 | Контактор 3 |

Выбираем один настенный шкаф Hyperline TWM-0945-GR-RAL9004 Шкаф настенный, 501x600x450, со стеклянной дверью (рис.14).



Рисунок 14 - Внешний вид шкафа электроавтоматики

Так как из-за массогабаритных показателей проблемно ставить ПЧ в шкаф электроавтоматики, то ПЧ ставим в отдельный шкаф. И выбираем Hyperline ТТС-2268-GS-RAL9004, 1166x600x800 (рис.15).



Рисунок 15 - Внешний вид шкафа Hyperline для ПЧ

2.10. Выбор и обоснование контроллера из линейки Siemens Logo

Логические модули LOGO! являются компактными функционально оконченными универсальными изделиями. Они предназначены для построения простейших механизмов автоматики с логическим обработыванием информации. Алгоритм функционирования модулей заносится программой, составленной из набора встроенных функций. Программирование модулей *LOGO! Basic* может производиться с их клавиатуры без использования добавочного программного обеспечения. Стоимостные показатели модулей настолько низки, что их применение может оказаться экономически целесообразным даже в случае замены устройств, включающих в свой состав 2 многофункциональных реле времени или 2 таймера и 3-4 промежуточных реле.

Серия продуктов *LOGO!* соединяет в своем составе логические модули LOGO! Basic и LOGO! Pure, модули ввода-вывода дискретных сигналов DM8 (4 входа, 4 выхода) и DM16 (8 входов, 8 выходов), модули ввода аналоговых сигналов AM2 (2 входа) и аналогового вывода AM2 AQ (2 выхода), коммуникационные модули, модули бесшумной коммутации трехфазных цепей переменного тока LOGO! Contact, блоки питания LOGO! Power, аксессуары, а также программное обеспечение LOGO! Soft Comfort.

Из условий технического процесса нам потребуется контроллер с числом дискретных входов – 5 шт., аналоговых входов – 1 шт., дискретных выходов – 4. Также нужен один аналоговый вход и возможность управления преобразователем частоты.

В приложении А представлена таблица сигналов цепи управления логического контроллера.

Из линейки логических модулей LOGO! Basic выбираем логический модуль LOGO! 12/24RC (рис.16). Модуль обладает следующими техническими данными, представленными в таблице 8.



Рисунок 16 - Логический модуль LOGO! 24 Basic

Таблица 8 - Технические данные модуля LOGO! 24 Basic

| | |
|---|---|
| Напряжение питания/входное напряжение, В | 12/24 постоянного тока |
| Дискретные входы | |
| Количество (группы)/ тип | 8 (1x8)/ Общий плюс или минус для всех входов |
| Входное напряжение, В: • низкого уровня, не менее • высокого уровня, не более | 5 постоянного тока 8,5 постоянного тока |
| Количество (группы)/тип | 4 (4x1)/замыкающие контакты реле |
| Импульсный ток выхода, А | 30 |
| Длительно допустимый ток выхода, А | 10 |

Для реализации управления процессом необходимо дополнить логический модуль LOGO! Basic модулем дискретного ввода/вывода, имеющем минимум два выходных и три входных канала. Выбираем модуль расширения ввода/вывода дискретных сигналов LOGO! DM8 12/24R, имеющем по 4 дискретных входа и выхода (рис.17).



Рисунок 17 - Модуль ввода-вывода дискретных сигналов LOGO! DM8 12/24R

Модули LOGO! DM позволяют увеличивать количество дискретных входов и выходов, обслуживаемых одним логическим модулем «LOGO!».

Технические данные модуля ввода-вывода дискретных сигналов LOGO! DM8 12/24R представлены в табл.9.

Таблица 9 - Технические данные модуля ввода-вывода дискретных сигналов LOGO! DM8 12/24R

| | |
|---|---|
| Напряжение питания/входное напряжение, В | 12/24 постоянного тока |
| Дискретные входы | |
| Количество (группы)/ тип | 4 (1x4)/ Нет гальванического разделения между входами |
| Входное напряжение, В: • низкого уровня, не менее • высокого уровня, не более | 5 постоянного тока 8,5 постоянного тока |
| Дискретные выходы | |
| Количество (группы)/тип | 4 (4x1)/замыкающие контакты реле |
| Импульсный ток выхода, А | 30 |
| Длительно допустимый ток выхода, А | 5 |

3. Расчёт статических и динамических характеристик для разомкнутой системы регулируемого электропривода

3.1. Расчёт естественных характеристик системы регулируемого электропривода

Синхронная угловая скорость вращения двигателя:

$$\omega_c = \frac{\pi \cdot n_c}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314,159 \text{ рад / с}$$

Номинальная частота вращения двигателя:

$$n_{\text{дв.н}} = (1 - S_n) \cdot n_c = (1 - 0,023) \cdot 3000 = 2930 \text{ об / мин}$$

Номинальная угловая скорость:

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - S_n) \cdot \omega_c = (1 - 0,023) \cdot 314,159 = 306,83 \text{ рад / с}$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{22000}{306,83} = 71,701 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Тогда номинальный фазный ток:

$$I_{\text{фн}} = \frac{P_{\text{дв}}}{m \cdot U_{\text{ф}} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{22000}{3 \cdot 220 \cdot 0,87 \cdot 0,91} = 42,103 \text{ А}$$

Для расчетов статических и динамических характеристик асинхронного двигателя найдем параметры схемы замещения. Т – образная схема замещения асинхронного двигателя для одной фазы приведена на рисунке 18.

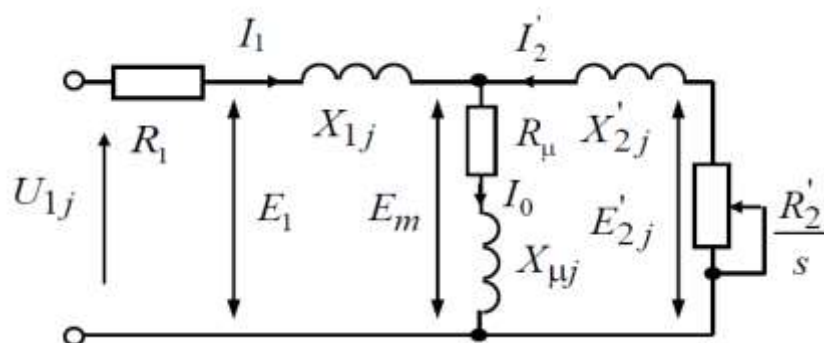


Рисунок 18 - Схема замещения асинхронного двигателя

Асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при нагрузке на 10 – 15 % меньше номинальной. Коэффициент мощности при нагрузке равной значительно отличается от мощности при

номинальной нагрузке, причем это отличие сильно зависит от мощности двигателя и для известных серий асинхронных двигателей с достаточной для практики точностью подчиняется зависимости, приведённой на рис. 19.

Коэффициент мощности при частичной загрузке:

$$\cos \varphi_{p^*} = 0,98 \cdot \cos \varphi_n = 0,95 \cdot 0,87 = 0,853$$

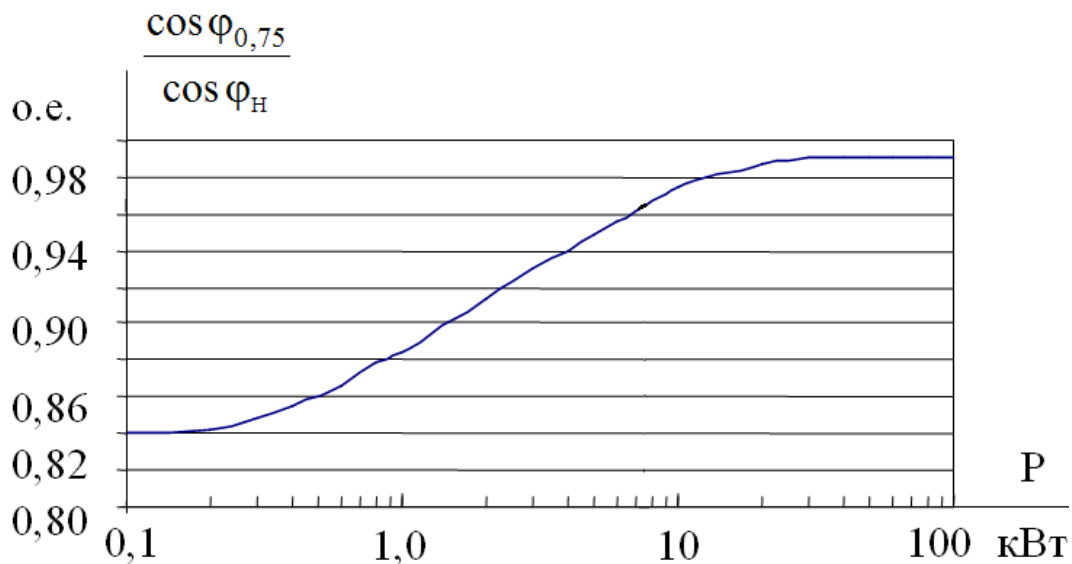


Рисунок 19 – Зависимость $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_n$ от мощности асинхронных двигателей

Коэффициент загрузки двигателя принимаем $p^* = 0,75$ из-за указанных выше особенностей проектирования асинхронных двигателей.

Тогда ток статора двигателя при частичной загрузке равен:

$$I_{11} = \frac{p^* \cdot P_{\text{дв}}}{m \cdot U_{\phi} \cdot \cos \varphi_{p^*} \cdot \eta_n} = \frac{0,75 \cdot 22000}{3 \cdot 220 \cdot 0,853 \cdot 0,91} = 32,222 \text{ A}$$

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(\frac{p^* \cdot I_{\phi n} \cdot (1 - S_n)}{1 - p^* \cdot S_n} \right)^2}{1 - \left(\frac{p^* \cdot (1 - S_n)}{1 - p^* \cdot S_n} \right)^2}} = \sqrt{\frac{32,222^2 - \left(\frac{0,75 \cdot 42,103 \cdot (1 - 0,023)}{1 - 0,75 \cdot 0,023} \right)^2}{1 - \left(\frac{0,75 \cdot (1 - 0,023)}{1 - 0,75 \cdot 0,023} \right)^2}} = 10,915 \text{ A}$$

Из формулы Клосса следует соотношение для расчета критического скольжения:

$$S_{кр.} = S_n \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot S_n \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot S_n \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} =$$

$$= 0,023 \cdot \frac{2,9 + \sqrt{2,9^2 - (1 - 2 \cdot 0,023 \cdot 1 \cdot (2,9 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,023 \cdot 1 \cdot (2,9 - 1)} = 0,144 \text{ o.e}$$

где в первом приближении коэффициент $\beta = 1$

Момент критический двигательного режима:

$$M_{кр.} = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_n \cdot C_1 \cdot \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314,159 \cdot 1,019 \cdot \left[0,138 + \sqrt{0,138^2 + 0,944^2} \right]} = 207,933 \text{ H} \cdot \text{м}$$

Критическое скольжение:

$$S_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \pm \frac{0,135}{\sqrt{0,138^2 + 0,944^2}} = \pm 0,142$$

Максимальный момент двигателя:

$$M_{\max} = k_{\max} \cdot M_n = 2,9 \cdot 71,701 = 207,933 \text{ H} \cdot \text{м}$$

Минимальный момент двигателя:

$$M_{\min} = k_{\min} \cdot M_n = 2 \cdot 71,701 = 143,402 \text{ H} \cdot \text{м}$$

Предварительно для расчёта активных и индуктивных сопротивлений (параметров схемы замещения) обмоток статора и ротора определяются следующие коэффициенты:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{\phi n}} = 1 + \frac{10,915}{2 \cdot 7 \cdot 42,103} = 1,019$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{\phi}^2 \cdot (1 - S_n)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_{\partial \theta}} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,023)}{2 \cdot 1,019 \cdot 2,9 \cdot 22000} = 1,091$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{S_{кр}} \right) \cdot C_1} = \frac{1,091}{\left(1 + \frac{1}{0,144} \right) \cdot 1,019} = 0,135 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление обмотки статора определяется по следующему выражению:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1,019 \cdot 0,135 \cdot 1 = 0,138 \text{ Ом}$$

Параметр γ , для определения сопротивления короткого замыкания:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{S_{кр}^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,144^2} - 1^2} = 6,856$$

$$X_\kappa = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 6,856 \cdot 1,019 \cdot 0,135 = 0,944 \text{ Ом}$$

Тогда, индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, приближённо может быть рассчитано:

$$X'_2 = 0,58 \cdot \frac{X_\kappa}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{0,944}{1,019} = 0,537 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора:

$$X_1 = 0,42 \cdot X_\kappa = 0,42 \cdot 0,944 = 0,396 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания определяется через значение ЭДС обмотки статора

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_\phi \cdot \cos \varphi_n - R_1 \cdot I_{\phi n})^2 + (U_\phi \cdot \sin \varphi_n + X_1 \cdot I_{\phi n})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,87 - 0,138 \cdot 42,103)^2 + (220 \cdot 0,493 + 0,396 \cdot 42,103)^2} = \\ &= 207,06 \text{ В} \end{aligned}$$

Индуктивное сопротивление намагничивания:

$$X_m = \frac{E_1}{I_0} = \frac{207,06}{10,915} = 18,97 \text{ Ом}$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоками рассеяния:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{2\pi f} = \frac{0,396}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,001 \text{ Гн}$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоками рассеяния:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_2}{2\pi f} = \frac{0,537}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,002 \text{ Гн}$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре, создаваемым суммарным действием полюсов статора (индуктивность контура намагничивания):

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} = \frac{18,97}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,06 \text{ Гн}$$

Найденные параметры схемы замещения электродвигателя сведены в таблицу 10.

Таблица 10 - Параметры схемы замещения электродвигателя АИР180S2

| $R_1, \text{Ом}$ | $X_1, \text{Ом}$ | $L_{1\delta}, \text{Гн}$ | $X_m, \text{Ом}$ | $L_m, \text{Гн}$ | $R'_2, \text{Ом}$ | $X'_2, \text{Ом}$ | $L'_{2\delta}, \text{Гн}$ | $X_\kappa, \text{Ом}$ |
|------------------|------------------|--------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------|
| 0,138 | 0,396 | 0,001 | 18,97 | 0,06 | 0,135 | 0,537 | 0,002 | 0,944 |

Механическая характеристика асинхронного электродвигателя рассчитывается по формуле:

$$M = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot R'_2}{\omega_n \cdot s \cdot \left[\left(R_1 + R'_2 \cdot s^{-1} \right)^2 + \left(X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,135}{306,83 \cdot s \cdot \left[\left(0,138 + 0,135 \cdot s^{-1} \right)^2 + \left(0,396 + 0,537 \right)^2 \right]};$$

Численные значения механической характеристики сведены в таблицу 11.

Таблица 11 – Численные значения механической характеристики

| M | 0 | 212,33 | 202,28 | 165,48 | 135,9 | 114,15 | 97,98 | 85,64 | 75,97 | 68,22 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| ω | 306,83 | 273,03 | 239,32 | 205,57 | 171,82 | 138,07 | 104,32 | 70,57 | 36,82 | 3,06 |

Механическая характеристика асинхронного электродвигателя изображена на рисунке 20. Она справедлива в области номинальных скоростей.

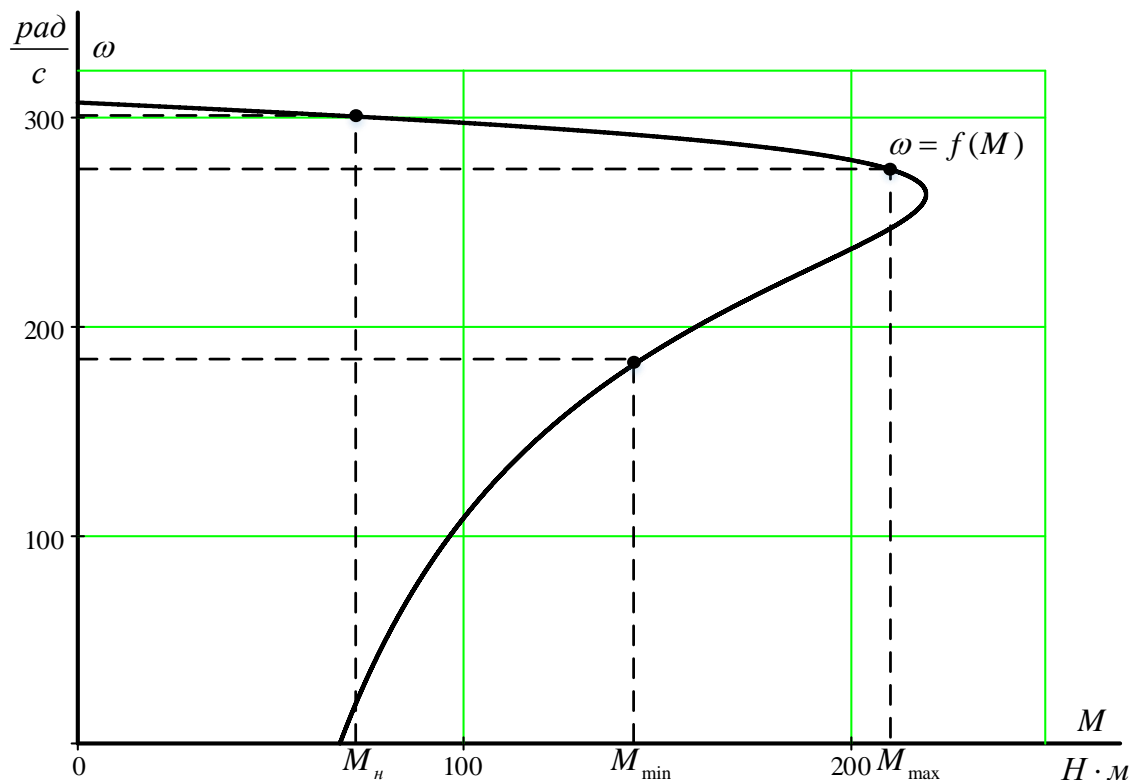


Рисунок 20 – Механическая характеристика асинхронного электродвигателя

Зависимость тока ротора I'_2 , приведенного к обмотке статора, от скольжения S определяется следующим образом:

$$I'_2(s) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,138 + \frac{0,135}{s}\right)^2 + (0,196 + 0,537)^2}} \text{ A} ;$$

Численные значения характеристики тока ротора сведены в таблицу 12.

Таблица 12 - Численные значения характеристики тока ротора

| | | | | | | | | | | |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| I'_2 | 0 | 132,95 | 183,52 | 203,3 | 212,73 | 217,98 | 221,23 | 223,41 | 224,95 | 226,1 |
| ω | 306,83 | 273,03 | 239,32 | 205,57 | 171,82 | 138,07 | 104,32 | 70,57 | 36,82 | 3,06 |

График электромеханической характеристики $\omega = f(I'_2)$ приведен на рисунке 21.

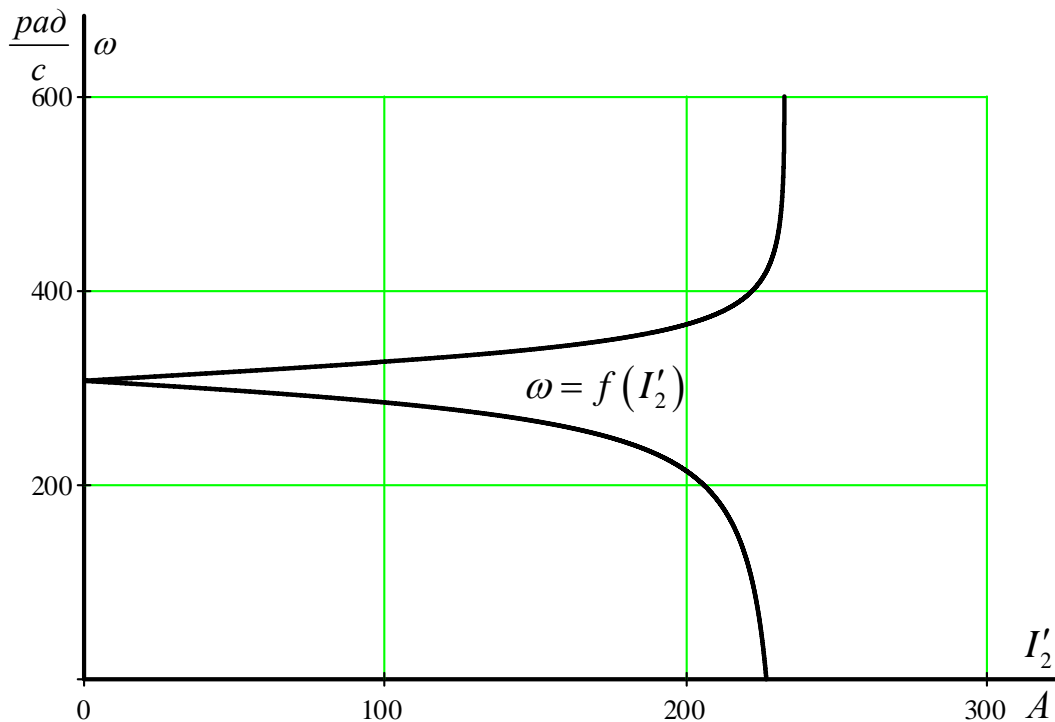


Рисунок 21 – График электромеханической характеристики тока обмотки ротора

$$\omega = f(I'_2)$$

Для построения электромеханической характеристики тока обмотки статора использовано следующее выражение:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_2(\omega)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(\omega) \cdot \sin \varphi_{2H}} =$$

$$= \sqrt{10,915^2 + I'_2(\omega)^2 + 2 \cdot 10,915 \cdot I'_2(\omega) \cdot \sin \varphi_{2H}}$$

Где,

$$\sin \varphi_{2H} = \frac{X_k}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_k^2}} = \frac{0,944}{\sqrt{\left(0,138 + \frac{0,135}{s}\right)^2 + 0,944^2}}$$

Численные значения характеристики тока статора сведены в таблицу 13.

Таблица 13 - Численные значения характеристики тока статора

| | | | | | | | | | | |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| I'_2 | 10,91 | 139,45 | 192,18 | 212,81 | 222,66 | 228,13 | 231,52 | 233,79 | 235,4 | 236,6 |
| ω | 306,83 | 273,03 | 239,32 | 205,57 | 171,82 | 138,07 | 104,32 | 70,57 | 36,82 | 3,06 |

Электромеханические характеристики двигателя приведены на рисунке 22.

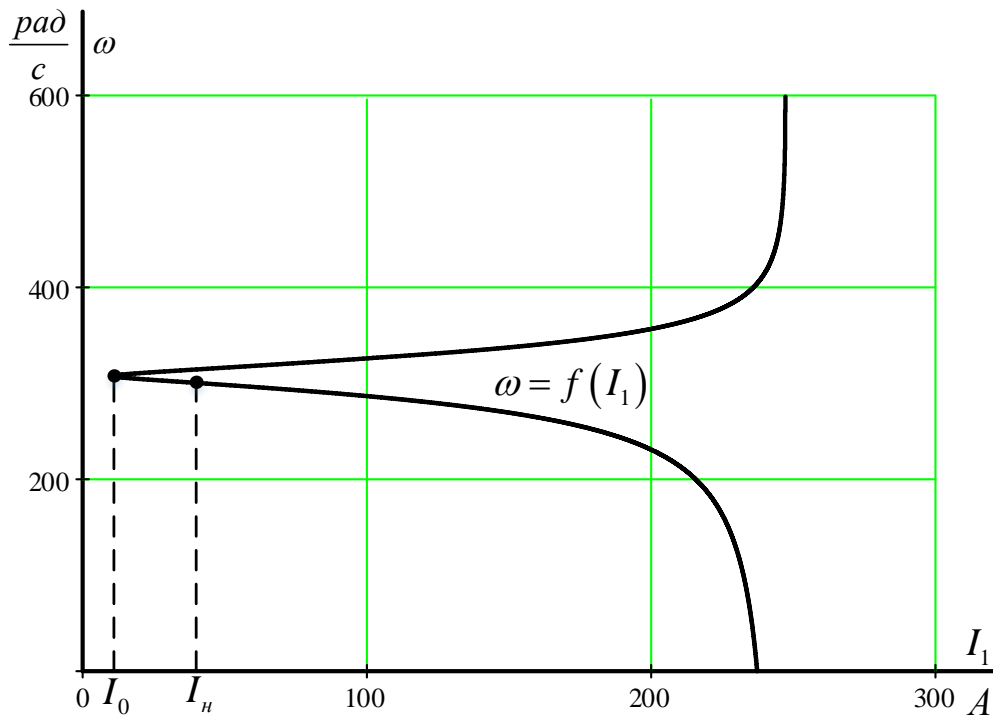


Рисунок 22 – График естественной электромеханической характеристики

$$I_1 = f(s) \text{ асинхронного двигателя}$$

Номинальный ток статора асинхронного двигателя $I_{1н}$ при номинальном скольжении $S_n = 0,023$ в соответствии с электромеханической характеристикой.

Номинальный ток ротора определяется при номинальном скольжении:

$$I'_2(s) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} =$$

$$\frac{220}{\sqrt{\left(0,138 + \frac{0,135}{0,023}\right)^2 + (0,396 + 0,537)^2}} = 36,649 \text{ A} ;$$

Номинальный ток статора двигателя:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_2(\omega)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(\omega) \cdot \sin \varphi_{2н}} =$$

$$\sqrt{10,915^2 + 36,649^2 + 2 \cdot 10,915 \cdot 36,649 \cdot 0,157} =$$

$$= 39,85 \text{ A};$$

3.2. Расчёт искусственных (регулирующих) характеристик системы регулируемого электропривода

Расчет характеристик производится для частот $f_1=50; 40; 20; 10$ Гц.

При законе регулирования $Z_p = \frac{U_{1H}}{f^2} = \frac{220}{50^2} = 0,088$

Относительные значения частот питающего напряжения:

$$\text{при } f_{1H1}=50 \text{ Гц} \quad f_{1*1} = \frac{f_{1H}}{f_{1H}} = \frac{50}{50} = 1$$

$$\text{при } f_{1H2}=40 \text{ Гц} \quad f_{1*2} = \frac{f_{2H}}{f_{1H}} = \frac{40}{50} = 0,8$$

$$\text{при } f_{1H3}=20 \text{ Гц} \quad f_{1*3} = \frac{f_{3H}}{f_{1H}} = \frac{20}{50} = 0,4$$

$$\text{при } f_{1H4}=10 \text{ Гц} \quad f_{1*4} = \frac{f_{4H}}{f_{1H}} = \frac{10}{50} = 0,2$$

Фазное напряжение обмотки статора асинхронного двигателя:

$$U_{1H1} = Z_p \cdot f_{1H1}^2 = 0,088 \cdot 50^2 = 220 \text{ В};$$

$$U_{1H2} = Z_p \cdot f_{1H2}^2 = 0,088 \cdot 40^2 = 140,8 \text{ В};$$

$$U_{1H3} = Z_p \cdot f_{1H3}^2 = 0,088 \cdot 20^2 = 35,2 \text{ В};$$

$$U_{1H4} = Z_p \cdot f_{1H4}^2 = 0,088 \cdot 10^2 = 8,8 \text{ В}.$$

В соответствии с представленными частотами питающего напряжения произведем расчет значений скорости идеального холостого хода:

$$\omega_{01} = \frac{2\pi \cdot f_{1H1}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 314,159 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{02} = \frac{2\pi \cdot f_{1H2}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 40}{2} = 251,327 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{03} = \frac{2\pi \cdot f_{1H3}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 20}{2} = 125,664 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{04} = \frac{2\pi \cdot f_{1H4}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10}{2} = 62,832 \text{ рад/с}.$$

Токи холостого хода при данных частотах регулирования:

$$I_{01} = \frac{U_{1H1}}{X_{\mu H}} = \frac{220}{18,97} = 10,54 \text{ А};$$

$$I_{02} = \frac{U_{1H2}}{X_{\mu H} \cdot f_{1*2}} = \frac{140,8}{18,97 \cdot 0,8} = 9,27 \text{ А};$$

$$I_{03} = \frac{U_{1H3}}{X_{\mu H} \cdot f_{1*3}} = \frac{35,2}{18,97 \cdot 0,4} = 4,63 \text{ A};$$

$$I_{04} = \frac{U_{1H4}}{X_{\mu H} \cdot f_{1*4}} = \frac{8,8}{18,97 \cdot 0,2} = 2,31 \text{ A}.$$

Численные значения характеристики тока ротора сведены в таблицу 14.

Таблица 14 – Численные значения характеристики тока ротора

| | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 40 | I_2' | 0 | 90,5 | 132,2 | 150,7 | 160,2 | 165,7 | 169,2 | 171,5 | 173,2 | 174,5 |
| $\Gamma\omega$ | ω | 251,3 | 223,6 | 196 | 168,3 | 140,7 | 113,1 | 85,45 | 57,8 | 30,15 | 2,5 |
| 20 | I_2' | 0 | 24,9 | 42 | 53,1 | 60,4 | 65,4 | 69,1 | 71,7 | 73,7 | 75,3 |
| $\Gamma\omega$ | ω | 125,6 | 111,8 | 98 | 84,19 | 70,37 | 56,54 | 42,72 | 28,9 | 15,8 | 1,25 |
| 10 | I_2' | 0 | 6,4 | 11,4 | 15,29 | 18,3 | 20,6 | 22,6 | 24,16 | 25,45 | 26,53 |
| $\Gamma\omega$ | ω | 62,8 | 55,9 | 49 | 42,1 | 35,2 | 28,3 | 21,36 | 14,4 | 7,5 | 0,6 |

Электромеханические характеристики (рис. 23) $\Gamma_2(\omega)$ для выбранных частот строятся по выражениям:

$$I_2'(s, f) = \frac{U_1(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f) + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)}\right)^2}},$$

$$\text{Где, } \omega(s, f) = \omega_0(f) \cdot (1 - s).$$

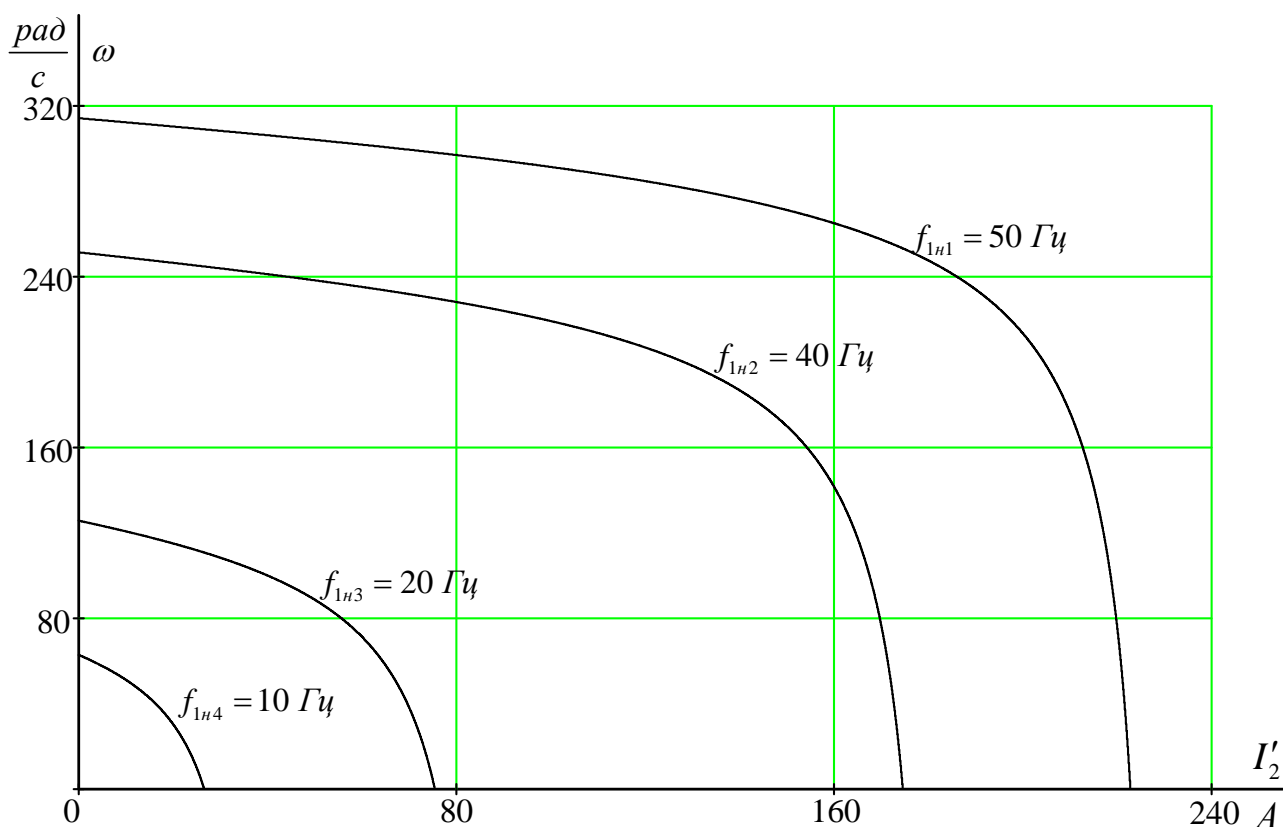


Рисунок 23 – Искусственные электромеханические характеристики тока ротора

$$I'_2(\omega)$$

Численные значения характеристики тока статора сведены в таблицу 15.

Таблица 15 – Численные значения характеристики тока статора

| | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 40 | I_1 | 7,5 | 94,2 | 137,2 | 156,3 | 166 | 171,6 | 175,2 | 177,6 | 179,3 | 180,6 |
| $\Gamma\omega$ | ω | 251,3 | 223,6 | 196 | 168,3 | 140,7 | 113,1 | 85,45 | 57,8 | 30,15 | 2,5 |
| 20 | I_1 | 3,7 | 26,2 | 43,8 | 55,2 | 62,8 | 67,9 | 71,6 | 74,4 | 76,5 | 78,1 |
| $\Gamma\omega$ | ω | 125,6 | 111,8 | 98 | 84,19 | 70,37 | 56,54 | 42,72 | 28,9 | 15,8 | 1,25 |
| 10 | I_1 | 1,87 | 6,93 | 12,01 | 16 | 19,1 | 21,5 | 23,5 | 25,1 | 26,4 | 27,59 |
| $\Gamma\omega$ | ω | 62,8 | 55,9 | 49 | 42,1 | 35,2 | 28,3 | 21,36 | 14,4 | 7,5 | 0,6 |

Также строятся электромеханические характеристики (рис.24) $I_1(\omega)$ для выбранных частот по выражениям

$$I_1(s, f) = \sqrt{(I_0(f))^2 + (I'_2(s, f))^2 + 2 \cdot I_0(f) \cdot I'_2(s, f) \cdot \sin \varphi_2(s, f)},$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s),$$

$$\text{где } \sin \varphi_2(s, f) = \frac{X_{KH} \cdot f_{1*}(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f)}};$$

$$I_0(f) = \frac{U_1(f)}{X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} - \text{ток холостого хода асинхронного двигателя в}$$

зависимости от частоты.

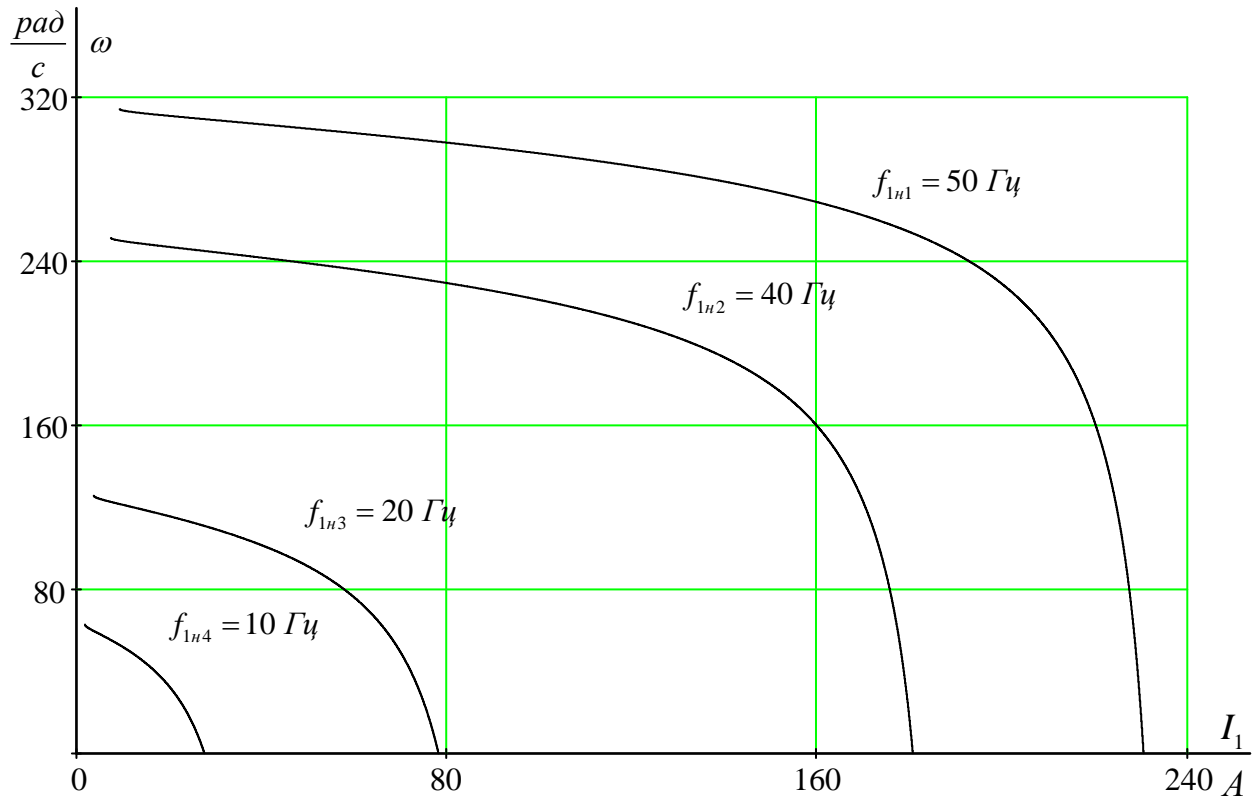


Рисунок 24 – Искусственные электромеханические характеристики тока статора

$$I_1(\omega)$$

Механические характеристики асинхронного двигателя $M(\omega)$ (рис. 25) рассчитываются для выбранных частот по выражениям

$$M(s, f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2 \cdot R'_2}{\omega_0(f) \cdot s \cdot \left[X_{\text{сн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\text{мн}} \cdot f_{1*}(f)} \right)^2 \right]},$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s).$$

Критический момент и скольжение можно определить по выражениям

$$M_K(f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2}{2 \cdot \omega_0(f) \cdot \left[R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{сн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2)} \cdot \left(1 + \frac{R_1^2}{X_{\text{мн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2} \right) \right]},$$

$$s_K(f) = R'_2 \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{R_1^2}{X_{\text{мн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2}}{R_1^2 + X_{\text{сн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2}},$$

$$\omega_K(f) = \omega(s_K(f), f).$$

Численные значения механической характеристики сведены в таблицу 16.

Таблица 16 – Численные значения механической характеристики

| | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| 40 | M | 0 | 119 | 127,3 | 110,4 | 93,5 | 80 | 69,5 | 61,3 | 54,6 | 49,32 |
| $\Gamma\omega$ | ω | 251,3 | 223,6 | 196 | 168,3 | 140,7 | 113,1 | 85,45 | 57,8 | 30,15 | 2,5 |
| 20 | M | 0 | 18,1 | 25,7 | 27,4 | 26,62 | 24,9 | 23,17 | 21,4 | 19,82 | 18,39 |
| $\Gamma\omega$ | ω | 125,6 | 111,8 | 98 | 84,19 | 70,37 | 56,54 | 42,72 | 28,9 | 15,8 | 1,25 |
| 10 | M | 0 | 2,4 | 3,8 | 4,5 | 4,8 | 4,9 | 4,9 | 4,8 | 4,7 | 4,5 |
| $\Gamma\omega$ | ω | 62,8 | 55,9 | 49 | 42,1 | 35,2 | 28,3 | 21,36 | 14,4 | 7,5 | 0,6 |

Расчёт функции нагрузки произведён далее. Момент трения $M_0 = 1,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

При частоте $f_{1н} = 50 \text{ Гц}$ нагрузка проходит через точку номинального режима двигателя. Коэффициент k при этом равен.

$$k = \frac{M_n - M_0}{\omega_n^3} = \frac{71,701 - 1,2}{306,83^3} = 0,00000244$$

Насосная нагрузка описывается функцией:

$$M_c = M_0 + k \cdot \omega^3 = 1,2 + 0,00000244 \cdot \omega^3$$

Механические характеристики двигателя и нагрузки, представлены на рис.

25.

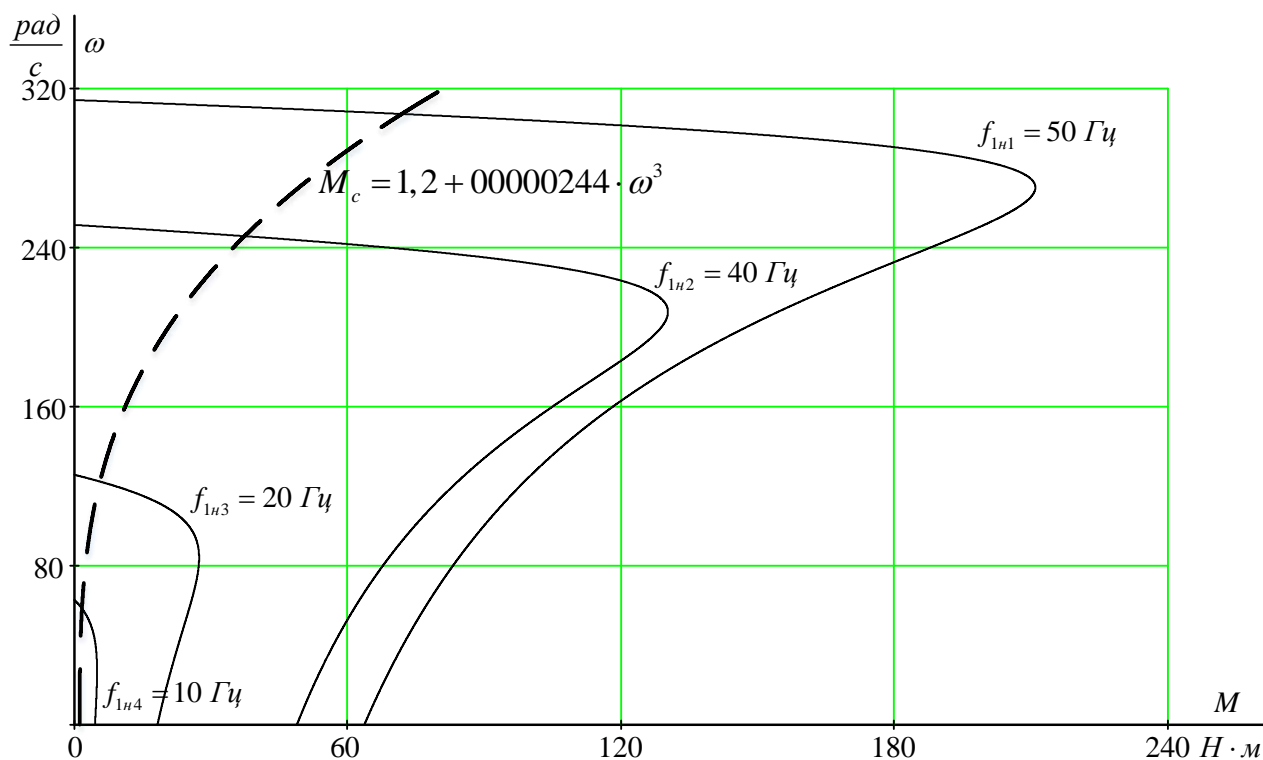


Рисунок 25 - Искусственные механические характеристики $M(\omega)$

Анализ полученных данных

Электромеханические характеристики:

При уменьшении частоты происходит уменьшение синхронной скорости,

т.к.

$$\omega_0 = \frac{60 \cdot f}{p} \cong f - \text{при уменьшении частоты синхронная скорость снижается.}$$

$$I'_{2кз} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + X_{кн}^2}} \cong \frac{U_1}{f} \cong f - \text{ток короткого замыкания обратно квадратному}$$

корню из частоты.

Механические характеристики:

$$\omega_0 = \frac{60 \cdot f}{p} \cong f - \text{при уменьшении частоты синхронная скорость снижается.}$$

$$s_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}} \cong \frac{1}{f}; M_k = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot [R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}]} \cong \frac{U_1^2}{f^2} \cong f^2.$$

Критические момент и скольжение обратно пропорциональны частоте.

$$M_{п} = 2 \cdot M_k \cdot s_k \cong f - \text{пусковой момент обратно пропорционален квадрату}$$

частоты.

3.3. Расчет потерь в асинхронном двигателе при работе на искусственных характеристиках

Определим потери в роторе при работе с насосной нагрузкой. Зададим функцию нагрузки. Примем момент трения $M_0 = 1,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Примем, что при частоте $f_{1н} = 50 \text{ Гц}$ нагрузка проходит через точку номинального режима двигателя.

Найдем частоты вращения, при которых происходит пересечение механических характеристик нагрузки и двигателя:

$$1. f_{1н1} = 50 \text{ Гц} - \omega_{p1} = 306,83 \text{ рад/с};$$

$$2. f_{1н2} = 40 \text{ Гц} - \omega_{p2} = 245,227 \text{ рад/с};$$

$$3. f_{1н3} = 20 \text{ Гц} - \omega_{p3} = 122,771 \text{ рад/с};$$

$$4. f_{1н4} = 10 \text{ Гц} - \omega_{p4} = 61,35 \text{ рад/с};$$

Определим момент нагрузки и скольжение для каждой частоты вращения.

$$1. M_{c1} = M_0 + k \cdot \omega_{p1}^3 = 1,2 + 0,00000244 \cdot 306,83^3 = 71,701 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p1} = \frac{\omega_{01} - \omega_{p1}}{\omega_{01}} = \frac{314,159 - 306,83}{314,159} = 0,023.$$

$$2. M_{c2} = M_0 + k \cdot \omega_{p2}^3 = 1,2 + 0,00000244 \cdot 245,227^3 = 37,182 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p2} = \frac{\omega_{02} - \omega_{p2}}{\omega_{02}} = \frac{251,327 - 245,227}{251,327} = 0,017.$$

$$3. M_{c3} = M_0 + k \cdot \omega_{p3}^3 = 1,2 + 0,00000244 \cdot 122,771^3 = 5,715 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p3} = \frac{\omega_{03} - \omega_{p3}}{\omega_{03}} = \frac{125,664 - 122,771}{125,664} = 0,023.$$

$$4. M_{c4} = M_0 + k \cdot \omega_{p4}^3 = 1,2 + 0,0000023 \cdot 61,35^3 = 1,731 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$s_{p4} = \frac{\omega_{04} - \omega_{p4}}{\omega_{04}} = \frac{62,832 - 61,35}{62,832} = 0,023.$$

Потери в роторе рассчитаем по выражению:

$$\Delta P_2 = \omega_0 \cdot s_p \cdot M_c$$

$$\Delta P_{21} = \omega_{01} \cdot s_{p1} \cdot M_{c1} = 314,159 \cdot 0,023 \cdot 71,701 = 518,08 \text{ Вт}.$$

$$\Delta P_{22} = \omega_{02} \cdot s_{p2} \cdot M_{c2} = 94,25 \cdot 0,017 \cdot 37,182 = 59,574 \text{ Вт}.$$

$$\Delta P_{23} = \omega_{03} \cdot s_{p3} \cdot M_{c3} = 62,83 \cdot 0,023 \cdot 5,715 = 8,258 \text{ Вт}.$$

$$\Delta P_{24} = \omega_{04} \cdot s_{p4} \cdot M_{c4} = 47,12 \cdot 0,023 \cdot 1,731 = 1,875 \text{ Вт}.$$

Анализируя потери в роторе можно сказать, что уменьшение частоты приводит к их уменьшению. Это можно объяснить тем что потери в двигателе прямо пропорциональны скорости двигателя и нагрузке.

По расчетным точка получена кривая отражающая зависимость потерь в роторе от частоты питающего напряжения. Она изображена на рис.26.

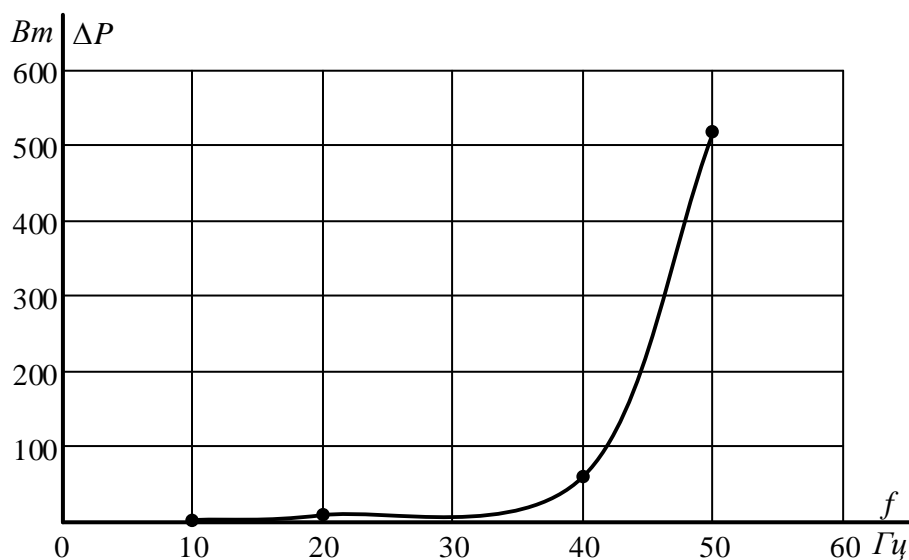


Рисунок 26 - Зависимость потерь в роторе от частоты питающего напряжения

3.4. Расчет переходных процессов скорости и момента для режима пуска, наброса и сброса нагрузки на валу двигателя

Моделирование асинхронного двигателя осуществляется с помощью программы MATLAB Simulink. Для создания имитационной модели использованы параметры схемы замещения двигателя (табл. 10).

Имитационная модель для снятия переходных процессов изображена на рис.27.

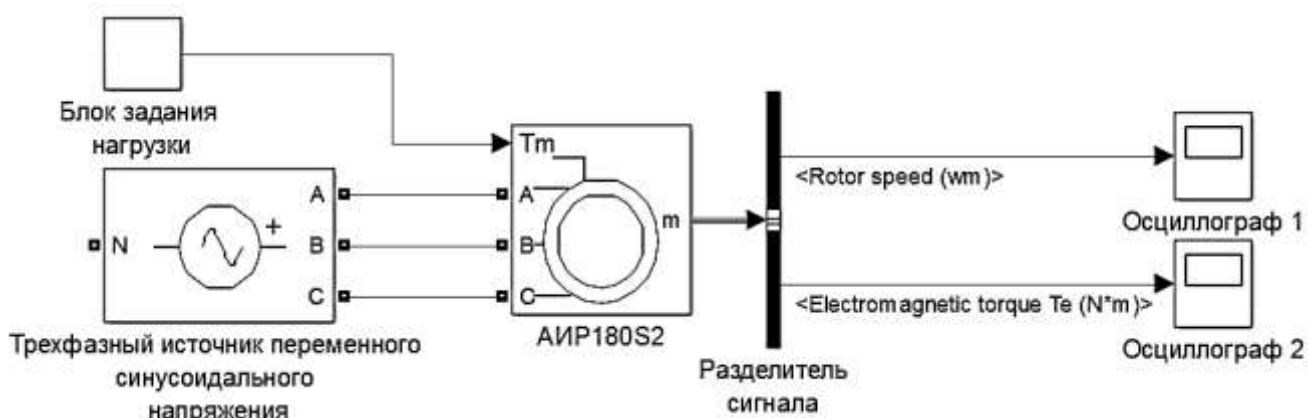


Рисунок 27 – Имитационная модель прямого пуска асинхронного двигателя

Для получения переходных характеристик пуска двигателя, наброса и сброса нагрузки в одних осях, была создана модель блока задания нагрузки, которая приведена на рис.28.

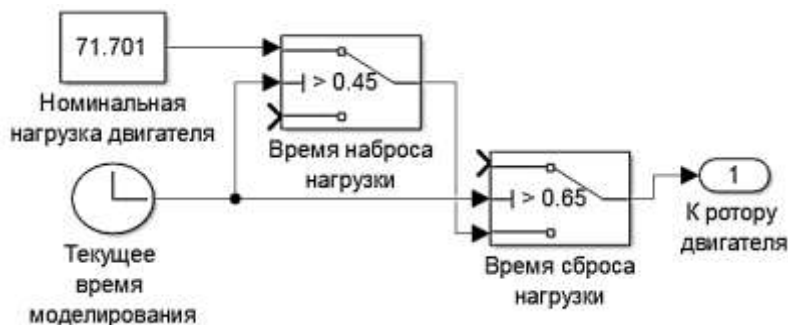


Рисунок 28 – Имитационная модель блока задания нагрузки

На рис. 29 – 31 представлены переходные характеристики скорости и момента, а также динамическая механическая характеристика при прямом пуске АД без нагрузки и при набросе нагрузки.

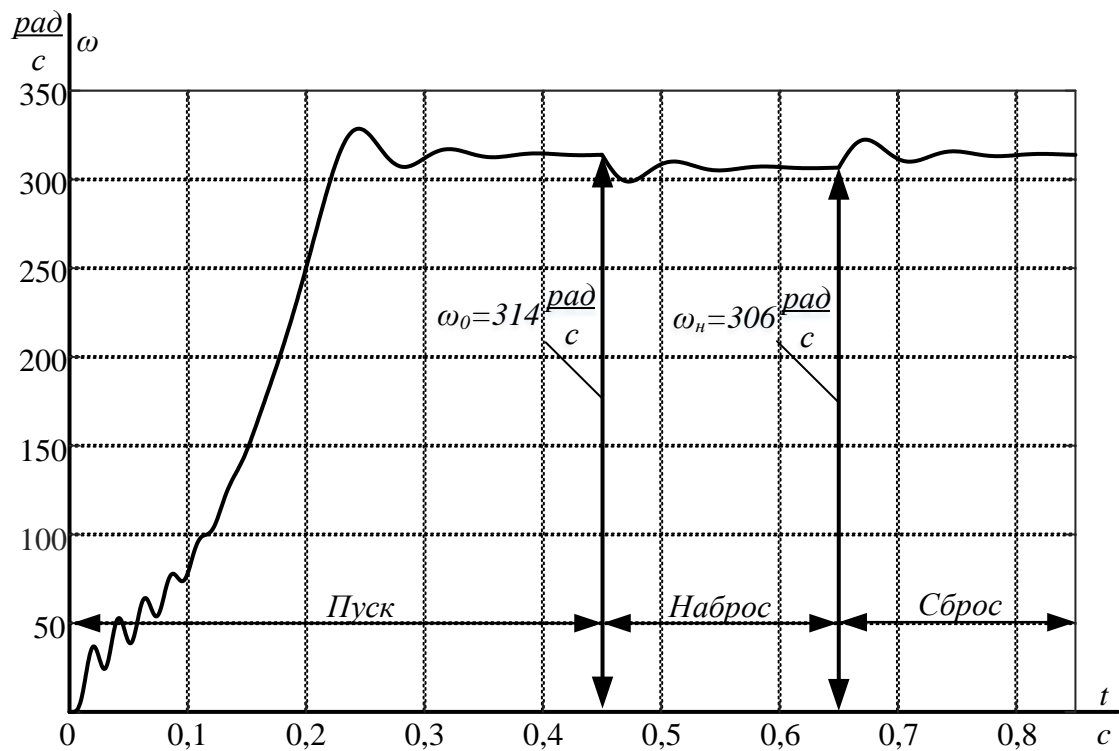


Рисунок 29 – Переходная характеристика $\omega=f(t)$ скорости ротора АД при пуске, набросе, сбросе нагрузки

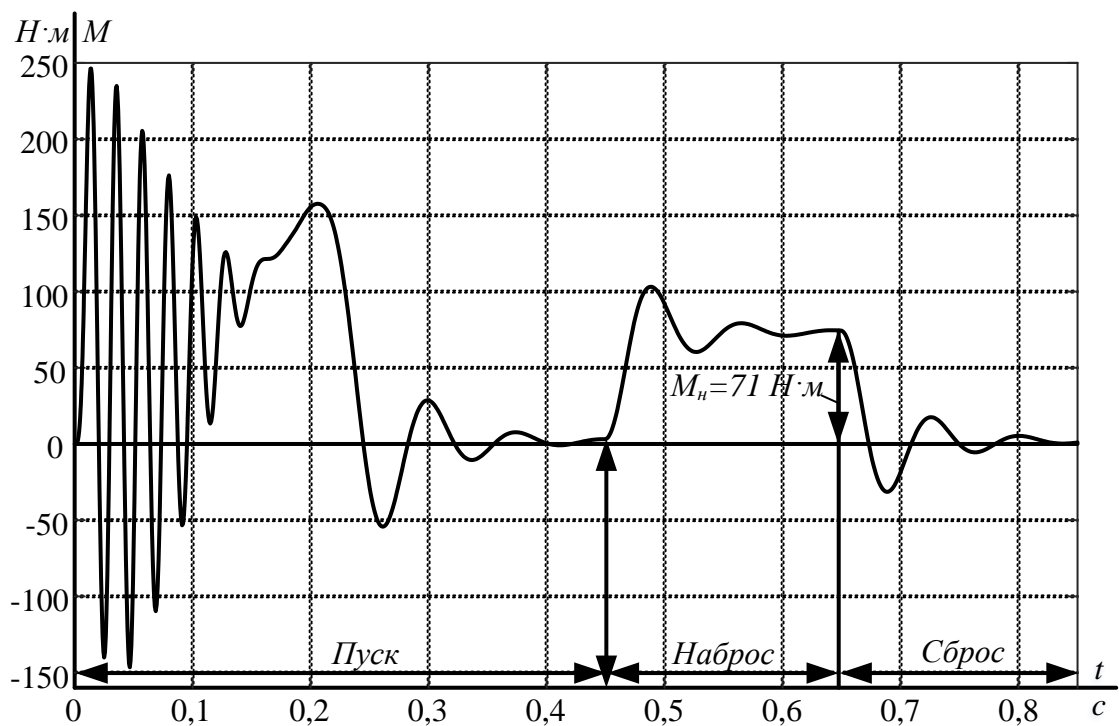


Рисунок 30 – Переходная характеристика $M=f(t)$ электромагнитного момента АД при пуске, набросе, сбросе нагрузки

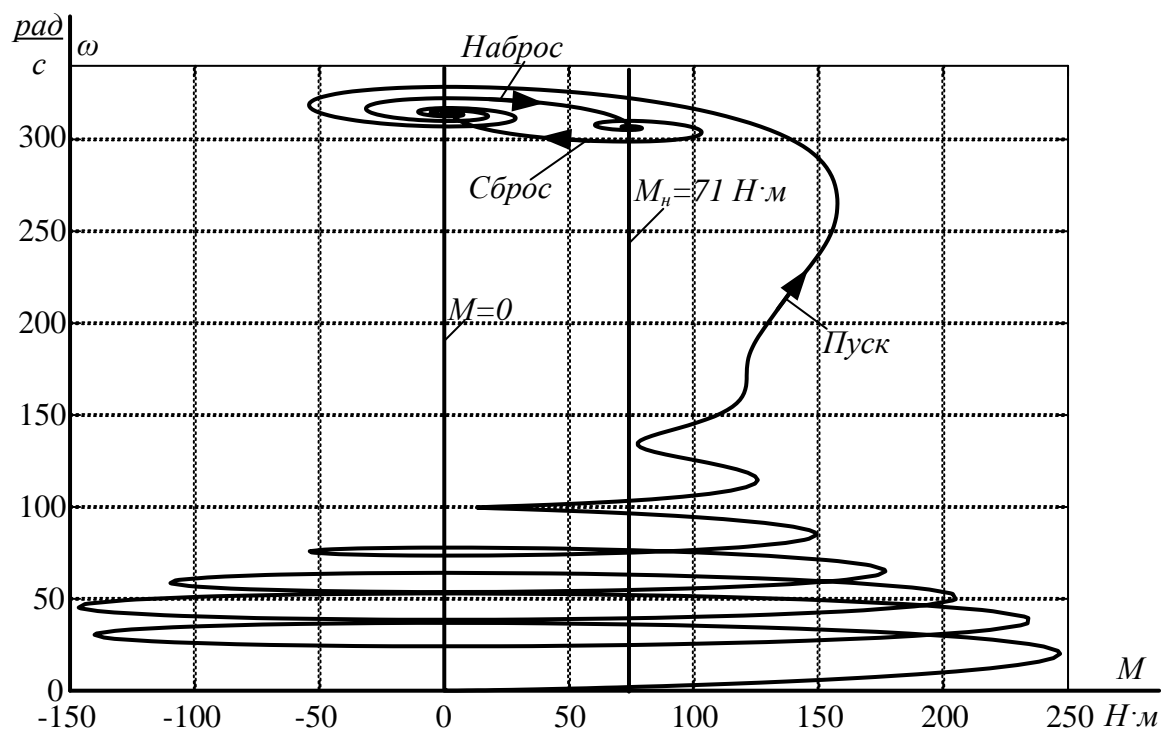


Рисунок 31 – Динамическая механическая характеристика $\omega=f(M)$ асинхронного двигателя при пуске, набросе, сбросе нагрузки

Как видно из графиков модель двигателя работает правильно, имитационная модель адекватна, двигатель выходит на номинальную скорость ($\omega_n=306 \text{ рад/с}$) при номинальной нагрузке ($M_n=71 \text{ Н·м}$) и частоте питающей сети. Следовательно, переходные характеристики получены верно.

4. Система автоматического управления электропривода

4.1. Разработка системы скалярного управления насоса в программной среде MatLab Simulink

Структурная схема частотного - регулируемого электропривода насоса в системе поддержания давления воды со скалярной IR-компенсацией представлена на рис.32.

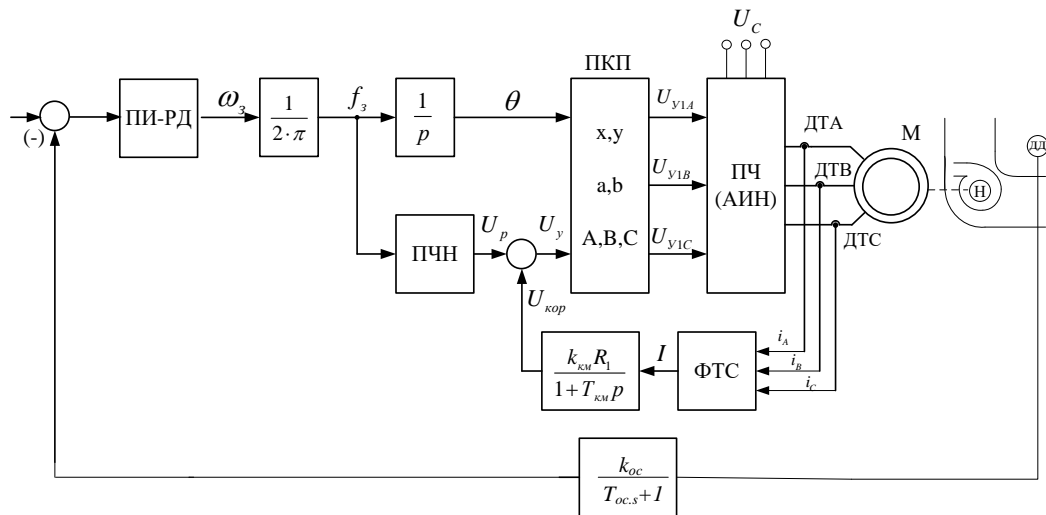


Рисунок 32 - Структурная схема частотного - регулируемого электропривода насоса в системе поддержания давления воды со скалярной IR-компенсацией

Для начала рассмотрим контур давления (рис.33).

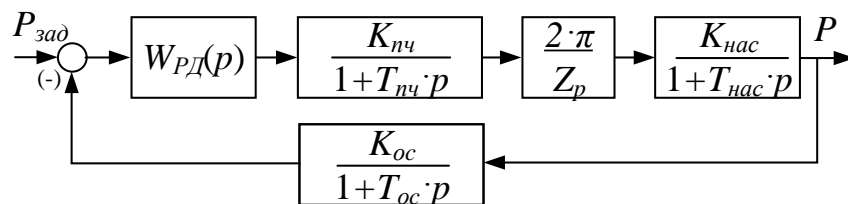


Рисунок 33 - Структурная схема контура давления

На рисунке 33 приняты следующие обозначения:

$W_{pd}(p)$ – передаточная функция регулятора давления;

$K_{нч}$ – коэффициент передачи преобразователя частоты;

Принимается $K_{нч} = 1$

$T_{нч}$ – постоянная времени запаздывания автономного инвертора напряжения;

$$\text{где } T_{пч} = \frac{1}{5000} = 0,0002 \text{ с}$$

$K_{нас}$ – коэффициент передачи насоса;

$$K_{нас} = \frac{p}{\omega_n} = \frac{4,839}{306,83} = 0,0158$$

где $p=4,839$ атм. – номинальное при ω_n

$T_{нас}$ – постоянная времени запаздывания насоса;

Принимается $T_{об} = 0,1$ с

$K_{ос}$ – коэффициент передачи обратной связи;

Принимается $K_{ос} = 1$

$T_{ос}$ – постоянная времени запаздывания обратной связи;

Принимается $T_{ос} = 0,1$ с .

Синтез регулятора давления на модульный оптимум

Разомкнутый контур давления (рис.34) с ПИ регулятором (рис.35), настроенный на модульный оптимум, должен иметь следующую передаточную функцию:

$$W_{TO}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)}$$

где T_{μ} – малая постоянная времени контура давления.

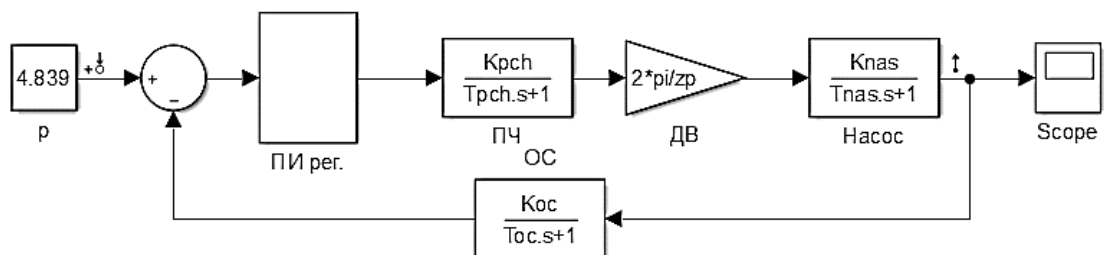


Рисунок 34 - Имитационная модель контура давления в программной среде
MatLab Simulink

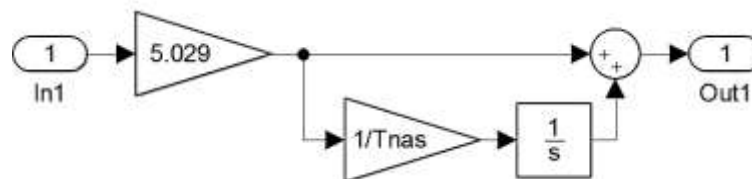


Рисунок 35 – Имитационная модель ПИ-регулятора

Передачная функция разомкнутого контура давления системы определяется следующим образом:

$$W_{\text{РАЗ КД}}(p) = W_{\text{РД}}(p) \cdot \frac{2\pi}{z_P} \cdot \frac{K_{\text{ПЧ}}}{1 + T_{\text{ПЧ}}p} \cdot \frac{K_{\text{НАС}}}{1 + T_{\text{НАС}}p} \cdot \frac{K_{\text{ОС}}}{1 + T_{\text{ОС}}p}$$

отсюда получается следующее выражение:

$$W_{\text{РД}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} \cdot \frac{(T_{\text{ПЧ}}p + 1)(T_{\text{НАС}}p + 1)(T_{\text{ОС}}p + 1)}{K_{\text{ПЧ}} \cdot K_{\text{НАС}} \cdot K_{\text{ОС}}} \cdot \frac{z_P}{2\pi}$$

При оптимизации, инерционность в канале обратной связи относится к «малым», и за малую некомпенсируемую постоянную времени всего контура принимают:

$$T_{\mu k} = T_{\mu} + T_{\text{ОС}} = 0,0002 + 0,1 = 0,1002$$

$$T_{\text{ОБ}} \gg T_{\text{ПЧ}}$$

$$T_{\text{ПЧ}} = T_{\mu}$$

$$W_{\text{РД}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu k}p(T_{\mu k}p + 1)} \cdot \frac{(T_{\mu k}p + 1)(T_{\text{НАС}}p + 1)}{K_{\text{ПЧ}} \cdot K_{\text{НАС}} \cdot K_{\text{ОС}}} \cdot \frac{z_P}{2\pi}$$

$$W_{\text{РД}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu k}p} \cdot \frac{(T_{\text{НАС}}p + 1)}{K_{\text{ПЧ}} \cdot K_{\text{НАС}} \cdot K_{\text{ОС}}} \cdot \frac{z_P}{2\pi}$$

После сокращения домножим полученное выражение на $T_{\text{ОБ}}$ после чего приведём выражение к каноническому виду.

$$\begin{aligned} W_{\text{РД}} &= \frac{T_{\text{НАС}} \cdot z_P}{2 \cdot T_{\mu k} \cdot K_{\text{ПЧ}} \cdot K_{\text{НАС}} \cdot K_{\text{ОС}} \cdot 2 \cdot \pi} \cdot \frac{(T_{\text{НАС}}p + 1)}{T_{\text{НАС}}p} = \\ &= \frac{0,1 \cdot 1}{2 \cdot 0,1002 \cdot 1 \cdot 0,0158 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3,14} \cdot \frac{(0,1p + 1)}{0,1p} = 5,029 \cdot \frac{(0,1p + 1)}{0,1p} \end{aligned}$$

Анализируя полученную передачную функцию регулятора, видно, что в дальнейшем моделировании требуется использовать ПИ-регулятор.

С помощью инструмента Linear Analysis программной среде MatLAB Simulink, получен переходный процесс контура давления и его показатели качества, которые представлены на рис.36.

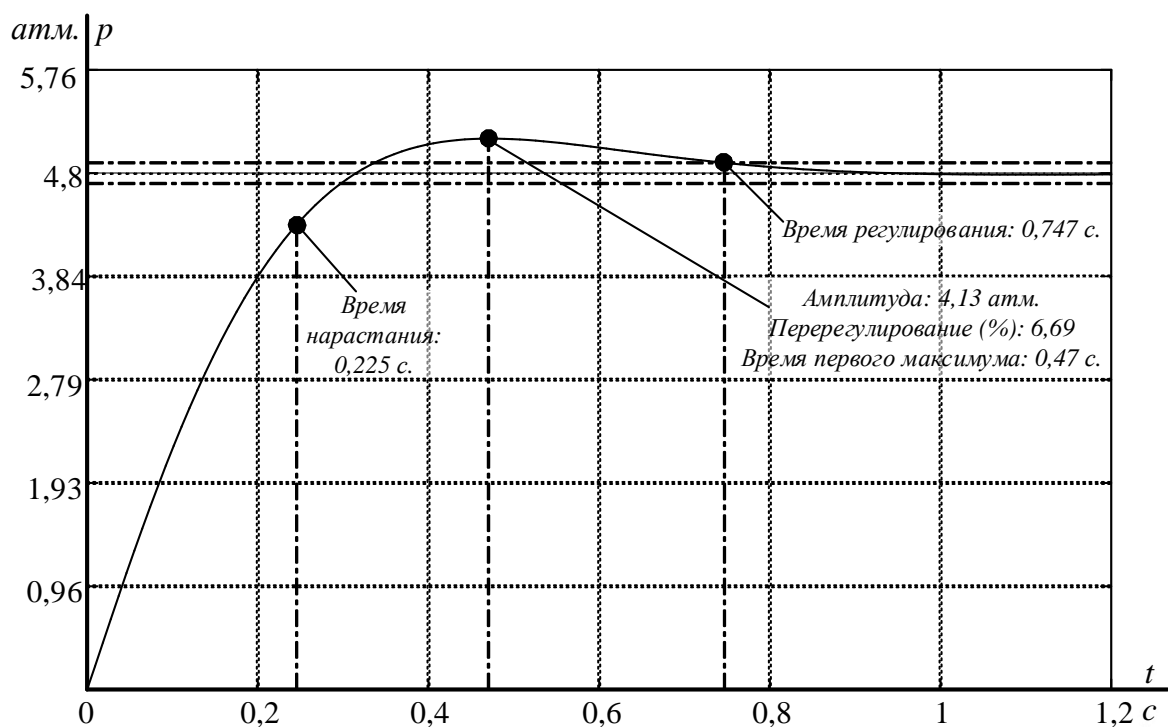


Рисунок 36 - Переходные процессы контура давления

В таблице 17 приведены показатели качества работы контура давления.

Таблица 17 - Показатели качества работы контура давления

| $t_{PY1}^{(5)}, c$ | $t_{PY2}^{(5)}, c$ | $\sigma, \%$ | $\Delta P_{уст}, A$ |
|--------------------------|--------------------|--------------|---------------------|
| Ожидаемые показатели | | | |
| 0,41082 | 0,41082 | 4,3% | 0 |
| Результаты моделирования | | | |
| 0,747 | 0,747 | 6,69% | 0 |

$$t_{PY1}^{(5)} = t_{PY2}^{(5)} = 4,1 \cdot (T_{\mu} + T_{ос}) = 4,1 \cdot (0,0002 + 0,1) = 0,41082$$

В результате моделирования можно сделать вывод, что контур давления настроен верно.

На рисунке 37 изображена имитационная модель асинхронного частотно-регулируемого электропривода насоса.

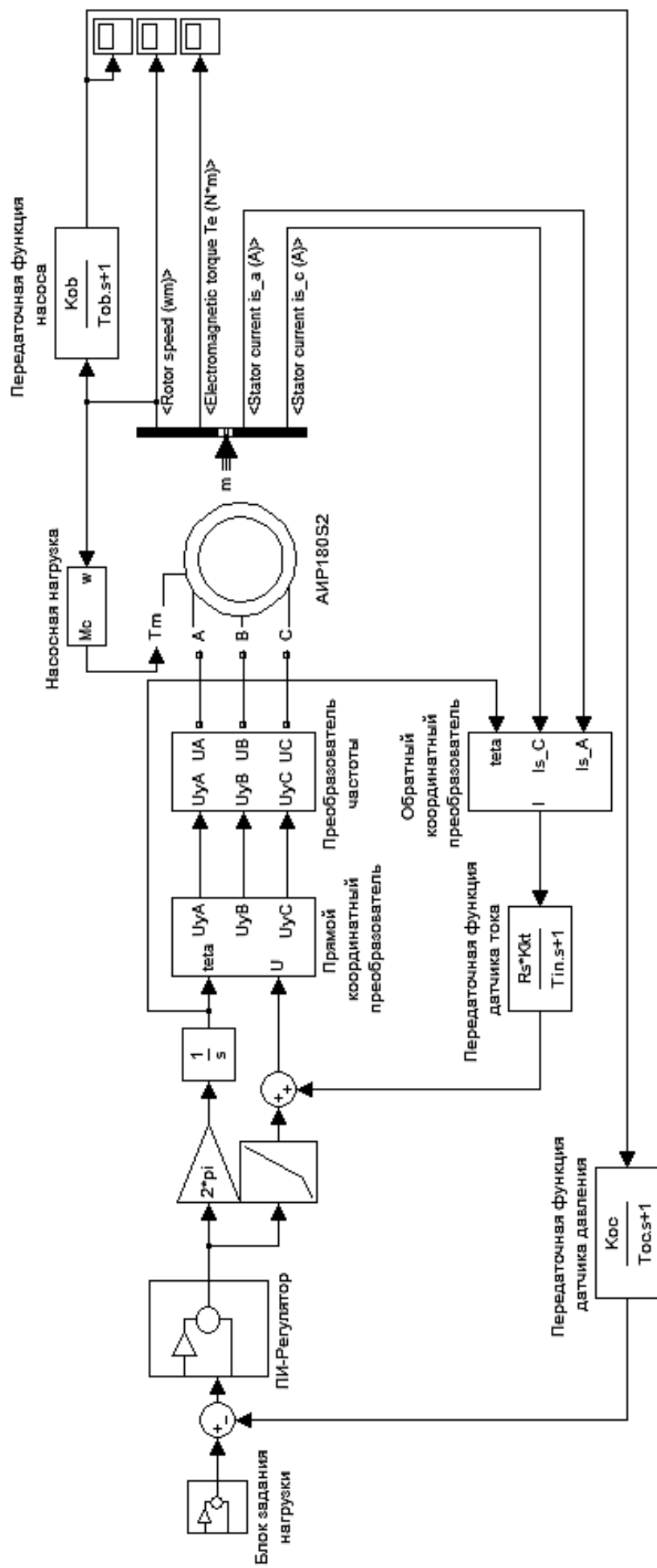


Рисунок 37 - Имитационная модель асинхронного частотно-регулируемого электропривода насоса в программной среде MatLab

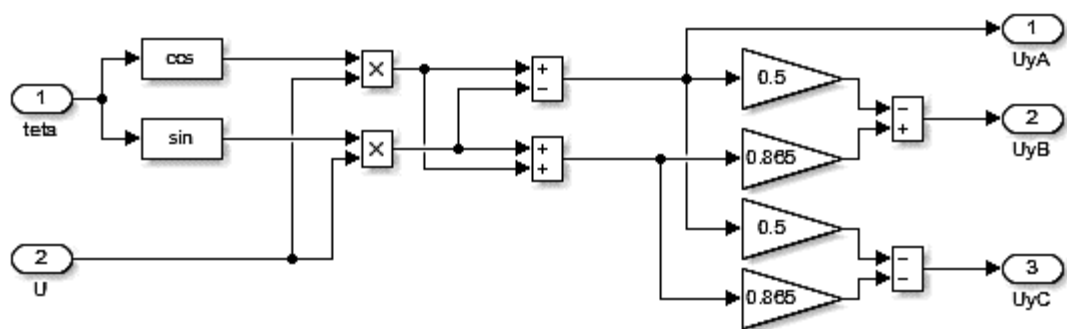


Рисунок 38 - Имитационная модель прямого координатного преобразователя

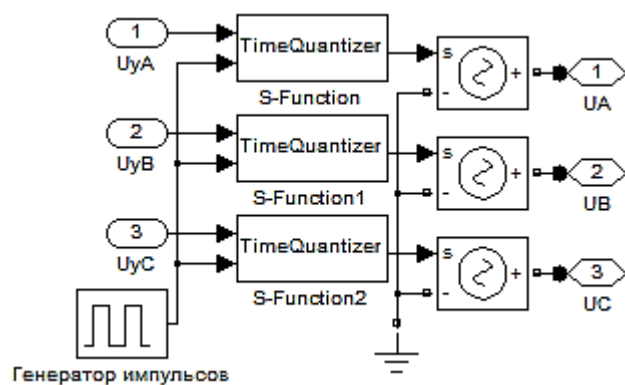


Рисунок 39 - Имитационная модель преобразователя частоты

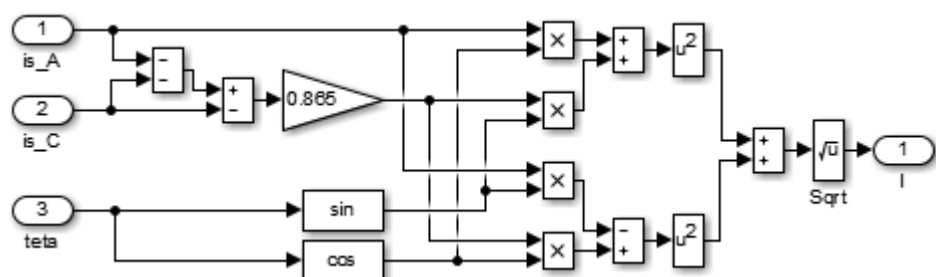


Рисунок 40 - Имитационная модель обратного координатного преобразователя

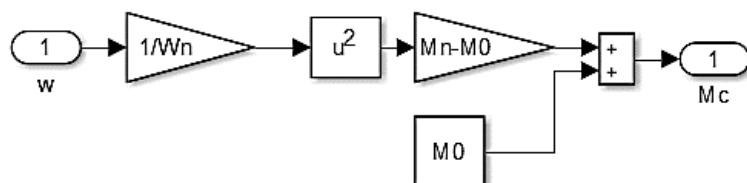


Рисунок 41 - Имитационная модель вентиляторной нагрузки

Результаты моделирования системы при приведены на рисунках 42-44

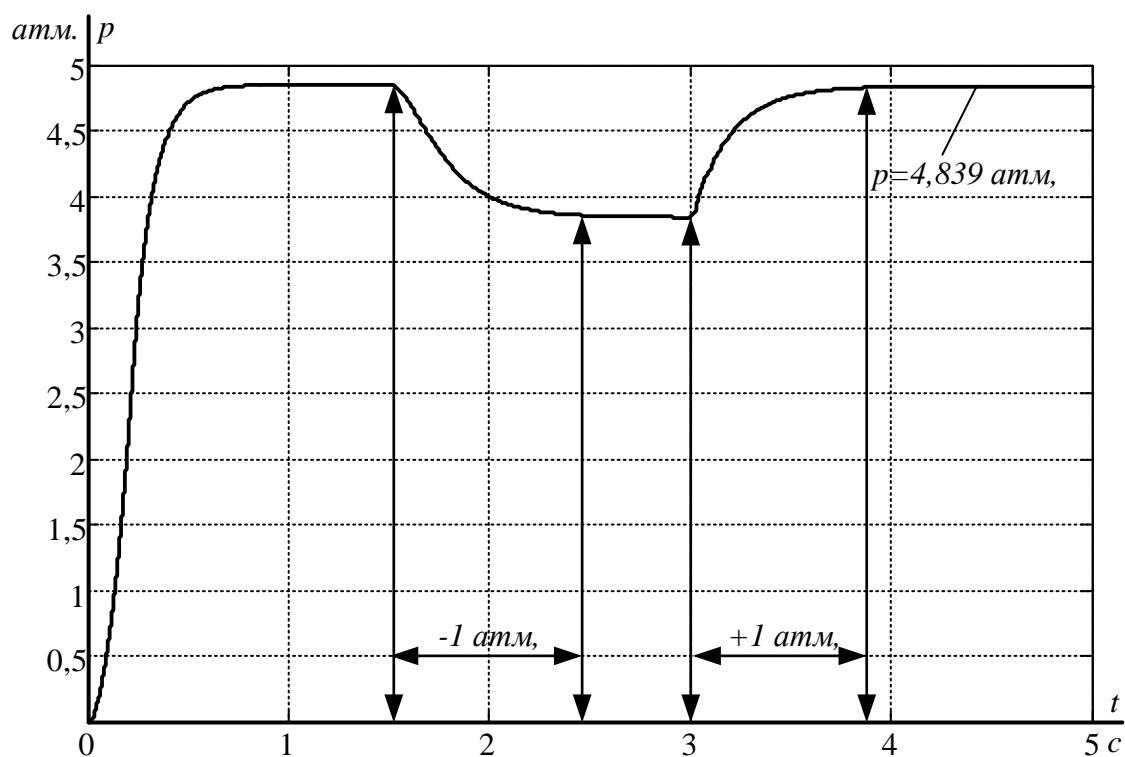


Рисунок 42 – Переходная характеристика давления насоса, при пуске и изменении давления на ± 1 атм.

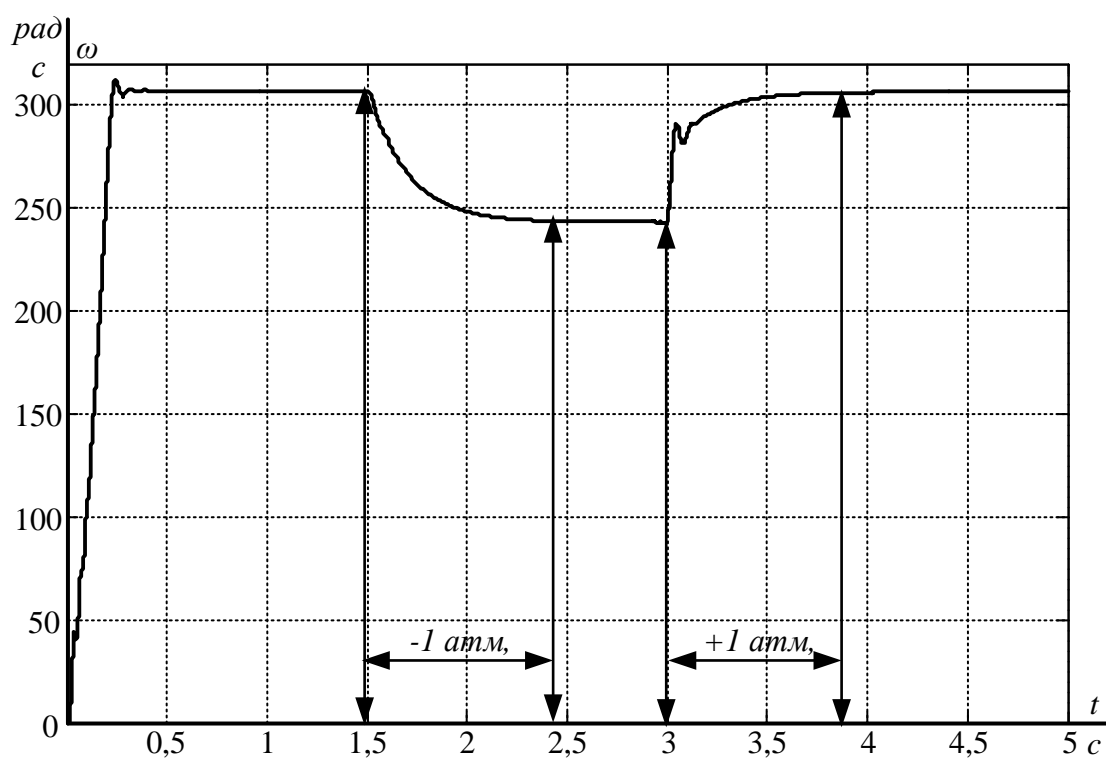


Рисунок 43 - Переходная характеристика скорости двигателя, при пуске и изменении давления на ± 1 атм.

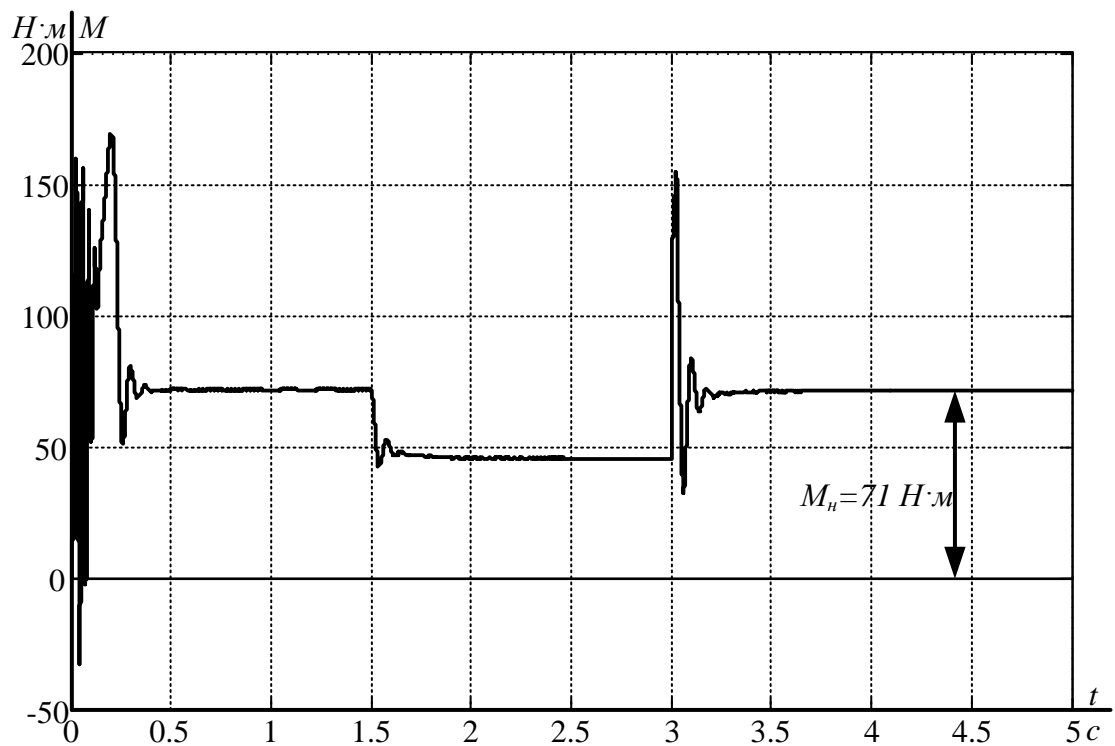


Рисунок 44 - Переходная характеристика электромагнитного момента двигателя, при пуске и изменении давления на ± 1 атм.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что система «преобразователь частоты – асинхронный двигатель – центробежный насос» работает адекватно и реагирует на различные изменения давления. Обладает астатизмом и достаточно быстро реагирует на изменение давления в контуре.

4.2. Разработка алгоритма функционирования системы управления

Основные требования, накладываемые на АСУ ТП, в максимальной степени должны обеспечивать необходимые функциональные возможности, желаемые технические характеристики технологического объекта управления (ТОУ):

1) ТП должен в полной мере обеспечивать все необходимые функции, накладываемые на него технологией производства: поддержание необходимого давления;

2) АСУ ТП должна обеспечивать ручной режим управления с пульта насоса;

3) АСУ должна обеспечивать точность управления ТП, наибольшую точность измерения величины выходного сигнала и высокую производительность;

4) АСУ ТП должна обеспечивать необходимую защиту и блокировки технологического оборудования от аварийных ситуаций, а также, сигнализацию и обнаружение наступления опасных (предаварийных) ситуаций;

5) Надежность АСУ ТП (способность системы выполнять свои функции, сохраняя эксплуатационные показатели в установленных пределах в течение заданного интервала времени при заданных условиях эксплуатации).

Степень достижения поставленных целей определяется критерием управления, т.е. показателем, характеризующим качество ведения ТП и принимающего числовые значения в зависимости от вырабатываемых системой управляющих воздействий, производительностью ТОУ при заданном качестве выходного процесса. Цепь управления должна обеспечивать максимальную точность управления. Все элементы цепи управления: регуляторы физических величин (регуляторы тока, скорости, давления), регулятор на входе электропривода, формирующий управляющее воздействие, устройства получения информации о состоянии ТП (датчик давления) и остальные информационные и управляющие устройства должны быть отстроены, согласно своим функциям и параметрам сигналов. Это условие позволит получить

наибольшую точность управления и в полном объеме обеспечить заданный технологический процесс, с максимальной производительностью.

После запуска системы происходит ввод параметров ее работы. Это давления подачи воды, скорость вращения насоса и т.д. После этого происходит проверка готовности системы к работе с заданными параметрами. Начинается проверка работоспособности оборудования, наличие связи между ПК и контроллером, контроллером и устройствами нижнего уровня и т.д.

Если по каким-то причинам система не готова к работе, то происходит их выяснение и устранение. Если после проверки не удалось устранить причину неисправности, происходит остановка системы. После положительной проверки работоспособности всех компонентов происходит запуск привода насоса Н1 (контактор КМ1 замыкается). Далее, если кнопка стоп нажата, например, по какой-либо не исправности, то происходит останов насоса, и соответственно, если кнопка стоп не нажата, то насос продолжает работу и происходит измерение давления датчиком давления. Если давление соответствует установленному, то происходит вращение насоса с установившейся скоростью, если давление не соответствует установленному, и скорость максимальна, то происходит переключение питания двигателя М1 с выхода ПЧ на сеть (размыкается контактор КМ1 и замыкается контактор КМ3), а к выходу ПЧ коммутируется (замыкается контактор КМ2) двигатель М2 и частота вращения увеличивается до требуемого значения. Если скорость не максимальна, то происходит изменение скорости вращения насоса, и процесс повторяется.

Схема алгоритма работы АСУ ТП представлена в приложении Б.

4.3. Поэтапная реализация технологического процесса в программе Logo! Soft Comfort v7.0

Исходное состояние системы: Кнопка Пуск отключена контакторы КМ1, КМ2 разомкнуты, датчик давления в положение 0, на выходах нет сигналов. При нажатии кнопки «пуск» I2, сигнал поступает на В001(И) и В002(И). Для запуска насоса Н1 на В001(И) также поступает сигнал о готовности ПЧ I6 и сигнал на включение двигателя Д1, только при совокупности этих сигналов запустится насос. Выходы Q1, Q3 показывают информацию о работе преобразователя частоты ПЧ и запуск насоса Н1, а I3 сигнализирует о срабатывании контактора КМ1. Далее при несоответствии давления заданного с давлением установившемся (определяем по датчику давления), ПЧ увеличивает скорость двигателя М1 – сигнал с датчика приходит на В005(И), и увеличение скорости наблюдается на блоке М3. Далее происходит автоматическое включение насоса Н2 при следующем увеличении давления, поступает сигнал на В006, на выход Q5 и далее на В002(И), куда также входит сигнал о готовности ПЧ, далее В008 (ИЛИ) и при совокупности двух сигналов на В009(И) – насос Н2 запускается, об этом свидетельствуют выходы Q2 и Q4, а М2 сигнализирует о срабатывании контактора КМ2. Запуск насоса Н2 возможен не только по датчику давления, а просто при нажатии I4 и наличии сигнала готовности от ПЧ I7. При этом на В013 поступает сигнал о повышении давления, и он переключает питание двигателя М1 с выхода ПЧ на сеть.

Схема технологического процесса насосной станции, смоделированная в программной среде Logo! Soft Comfort v7.0 представлена на рисунке 45.

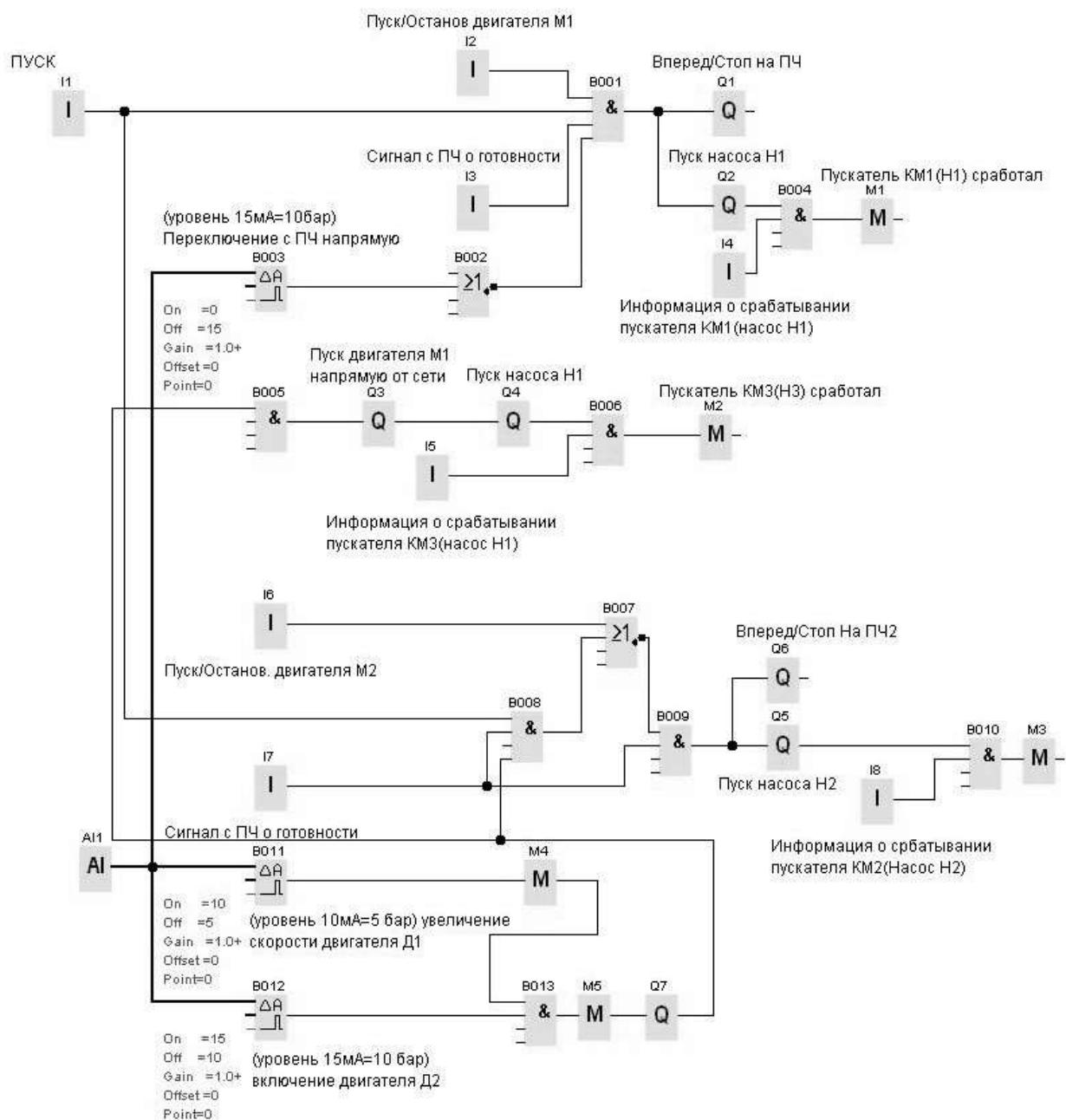


Рисунок 45 - Схема технологического процесса насосной станции

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является сравнение двух систем водоснабжения жилого дома, для определения их экономической и практической выгоды.

Традиционные способы регулирования подачи воды в жилые дома насосными установками состоят в дросселировании напорных линий и изменении общего числа работающих агрегатов – давлению на коллекторе или в диктующей точке сети, уровню в приёмном или регулирующем резервуаре и др. Эти способы регулирования практически не учитывают энергетических затрат при транспортировке воды. Таким образом, существуют предпосылки для создания более надёжного и энергосберегающего регулируемого электропривода.

Были проведены исследования в указанной проблемой области. Целью исследований была разработка технологии автоматизированного регулируемого электропривода, позволяющего добиться минимальных потерь воды и тепла при подаче в жилые дома, экономии энергии, повышения срока службы оборудования.

Разработанный регулируемый асинхронный электропривод для управления насосными агрегатами позволил обеспечить:

- плавный пуск электродвигателя, отсутствие механических нагрузок на двигатель и бросков тока в сети;
- отсутствие гидравлических ударов;
- эффективное использование потребляемой насосным агрегатом мощности во всем диапазоне регулирования;
- обеспечение коэффициента мощности двигателя насоса на значении, близком к 1,0;
- снижение уровня шума при пуске и работе;
- обеспечение автономной и безопасной работы, интеграция в АСУ ТП.

5.1. Экспертная оценка

Для того чтобы определить конкурентоспособность дросселирования и частотного регулирования по отношению друг к другу, была проведена экспертная оценка, которая позволяет наглядно показать насколько выгодно использовать тот или иной способ регулирования.

Экспертная оценка проводилась двумя независимыми экспертами по следующим критериям:

- цена – самый главный критерий, который зачастую и определяет выбор системы водоснабжения;
- КПД – коэффициент полезного действия насосной станции (зависит от выбранного способа регулирования);
- срок эксплуатации – период времени от начала эксплуатации технического устройства до достижения им предельного состояния;
- энергосбережение – второй по важности фактор, который характеризует, насколько экономно потребляет электроэнергию насосная станция;
- аварийность – показатель, характеризующий вероятность отказа оборудования или возникновения аварии.

В таблицах 18 и 19 экспертная оценка представлена сразу с учётом весового коэффициента, значение которого отражено цифрой в скобках.

Таблица 18 - Экспертная оценка способов регулирования насосной станции
(эксперт 1)

| Способы регулирования | Факторы конкурентоспособности | | | | | Итоговая оценка |
|-----------------------------|-------------------------------|---------|-------------------|------------------|-------------|-----------------|
| | Цена | КПД | Срок эксплуатации | Энергосбережение | Аварийность | |
| Дросселирование | 10(3,3) | 5(0,3) | 4(0,8) | 3(0,78) | 2(0,26) | 24(5,44) |
| Частотное | 1(0,33) | 10(0,6) | 10(2,0) | 10(2,6) | 9(1,17) | 40(6,7) |
| b_i – важность критерия | 5 | 1 | 3 | 4 | 2 | 15 |
| w_i – весовой коэффициент | 0,33 | 0,06 | 0,2 | 0,26 | 0,13 | 1 |

Таблица 19 - Экспертная оценка способов регулирования насосной станции
(эксперт 2)

| Способы регулирования | Факторы конкурентоспособности | | | | | Итоговая оценка |
|-----------------------------|-------------------------------|---------|-------------------|------------------|-------------|-----------------|
| | Цена | КПД | Срок эксплуатации | Энергосбережение | Аварийность | |
| Дросселирование | 10(3,3) | 2(0,12) | 3(0,6) | 2(0,52) | 3 (0,39) | 20 (4,93) |
| Частотное | 2(0,66) | 10(0,6) | 10(2,0) | 9(2,34) | 10(1,3) | 41(6,9) |
| b_i – важность критерия | 5 | 1 | 3 | 4 | 2 | 15 |
| w_i – весовой коэффициент | 0,33 | 0,06 | 0,2 | 0,26 | 0,13 | 1 |

Для того чтобы определить итоговую оценку экспертов, производим вычислительные операции, итог которых представлен в таблице 20.

Таблица 20 - Итоговые оценки

| Способы регулирования | Эксперты | | Итоговая оценка |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------------|
| | Эксперт 1 | Эксперт 2 | |
| Дросселирование | 5,44 | 4,93 | 5,19 |
| Частотное | 6,7 | 6,9 | 6,8 |

По итогам проведённой экспертной оценки вариант с частотным регулированием заслужено занял лидирующую позицию, несмотря на то, что стоит гораздо дороже, он позволяет экономить на ремонте оборудования, утечках воды и электроэнергии.

5.2. Расчёт стоимости систем водоснабжения

Для того чтобы сравнить стоимость насосной станции с частотным регулированием и с дросселированием, были составлены таблицах 21 и 22.

Таблица 21 - Стоимость насосной установки при дросселировании

| Наименование | Количество | Цена, руб. |
|----------------------------|-------------|------------|
| Двигатель | 1 | 16455 |
| Насос | 1 | 135000 |
| Контактор | 1 | 250 |
| Автоматический выключатель | 1 | 422 |
| Гидравлический дроссель | 1 | 3257 |
| Монтажные работы | 9 чел./час. | 9000 |
| Кабели | | |
| ВВГнг 5х25 | 5 | 2000 |
| ПВ-1 1х2,5 | 10 | 68 |
| Итого | | 166452 |

В стоимость насосной установки, помимо самого оборудования также входила и цена на монтажные работы, которая в зависимости от своей сложности и количества подключаемого оборудования различалась.

Цена на монтажные работы рассчитывается по следующей формуле:

Монтажные работы=Время работы·Сложность работы·1000,

где Сложность работы – определяется по 3 бальной шкале (1 – простая, 2 – сложная, 3 – очень сложная).

Пример расчёта стоимости монтажных работ при частотном регулировании:

$$15 \cdot 2 \cdot 1000 = 30000 \text{ руб.}$$

Таблица 22 - Стоимость насосной установки при частотном регулировании

| Наименование | Количество | Цена, руб. |
|----------------------------|--------------|------------|
| Двигатель | 2 | 32910 |
| Насос | 2 | 270000 |
| ПЧ | 1 | 36100 |
| Датчик давления | 1 | 3090 |
| Контактор | 3 | 750 |
| Автоматический выключатель | 2 | 844 |
| Блок питания | 1 | 5569 |
| Контроллер | 1 | 6458 |
| Монтажные работы | 15 чел./час. | 30000 |
| Кабели | | |
| ПВ-1 1х1,5 | 25 | 91 |
| ПВ-1 1х2,5 | 25 | 170 |

| Продолжение таблицы 22 | | |
|-------------------------------|----|--------|
| ВВГнг 5х25 | 15 | 6000 |
| Клеммные зажимы | | |
| Wago 773-324 | 2 | 10 |
| Wago 773-328 | 2 | 17 |
| Wago 264-711 | 4 | 104 |
| Wago 285-150 | 3 | 1587 |
| Шкафы электроавтоматики | | |
| Hyperline TWM-0945-GR-RAL9004 | 1 | 1450 |
| Hyperline TTC-2268-GS-RAL9004 | 1 | 7540 |
| Итого | | 402690 |

Глядя на таблицы 21 и 22 видно, что цена насосной установки при дросселировании почти в 2,5 раза дешевле, чем при варианте с частотным регулированием. И глядя на эти цифры становится, очевидно, то, что зачастую лица принимающие решения по модернизации оборудования, изучив стоимость внедрения преобразователей частоты, откладывают решение в долгий ящик, не осознавая долгосрочную выгоду проекта в целом. В действительности, каждое внедрение требует экономической оценки. И, безусловно, большинство компетентных инженеров в состоянии провести соответствующее технико-экономическое исследование. Тем более что рынок преобразователей достаточно насыщен и имеет широкий горизонт цен, в зависимости от функциональности и марки устройства.

Не стоит также забывать и о ряде существенных недостатков дросселирования, а именно:

- снижение КПД насосной станции, особенно при глубоком регулировании подачи;
- износ оборудования (двигатель, насос) из-за работы на пределе;
- рост давления на выходе насоса при закрытии задвижки приводит к сокращению срока службы уплотнений и запорных устройств, а также к увеличению утечек жидкости через стыки и щели;
- возможность однозонного регулирования в сторону уменьшения подачи или напора насосной установки.

5.3. Расчёт величины экономии

Посчитаем экономию электроэнергии насосной станции, которая достигается за счёт частотного способа регулирования.

Имеются два агрегата (рабочий и резервный) мощностью по 15 кВт каждый. Они обеспечивают подачу воды в жилой дом. Насосы работают на номинальной мощности только в периоды с часа ночи до 7 утра и днём с 10 до 16 часов. В остальное время производительность оборудования составляет 50% от номинала.

Учитывая, что потребляемая мощность электродвигателя прямо пропорциональна кубу производительности насоса, а КПД насосной установки приблизительно равен 0,82:

$$P_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 0,5}{\eta_{\text{нс}}} = \frac{22 \cdot 0,5}{0,82} = 13,42 \text{ кВт}$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателя;

0,5 – 50% производительности двигателя от номинала;

$\eta_{\text{нс}}$ – КПД насосной станции.

Стоимость 1 кВт электроэнергии ($C_{\text{ээ}}$) = 3 руб.

Определим электроэнергию, сэкономленную за сутки:

$$\Delta W_{\text{сут}} = \Delta P \cdot t = (P_{\text{ном}} - P_{\text{ном}}) \cdot t = (22 - 13,42) \cdot 12 = 102,96 \text{ кВт}.$$

Определим экономию за сутки:

$$\mathcal{E}_{\text{сут}} = \Delta W_{\text{сут}} \cdot C_{\text{ээ}} = 102,96 \cdot 3 = 308,88 \text{ руб.}$$

Определим экономию за год:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \mathcal{E}_{\text{сут}} \cdot 365 = 308,88 \cdot 365 = 112741 \text{ руб.}$$

Отдельно посчитаем экономию, которая достигается за счет энергосберегающих характеристик преобразователя частоты «Веспер».

Функция автоматической оптимизации энергопотребления дает 5% экономии, автоматическая адаптация двигателя добавляет 5%, а функция «Сон» дополнительно сберегает 5% энергии. Общая дополнительная экономия составит 15%.

Определим экономию за сутки:

$$\mathcal{E}_{\text{сут}2} = C_{\text{э}} \cdot 0,15 \cdot P_{\text{н}} \cdot t = 3 \cdot 0,15 \cdot 22 \cdot 12 = 119 \text{ руб.}$$

Определим экономию за год:

$$\mathcal{E}_{\text{год}2} = \mathcal{E}_{\text{сут}2} \cdot 365 = 119 \cdot 365 = 43435 \text{ руб.}$$

Определим общую экономию электроэнергии за год:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{год}} = \mathcal{E}_{\text{год}1} + \mathcal{E}_{\text{год}2} = 112741 + 43435 = 156176 \text{ руб.}$$

Расчёта основных финансовых показателей:

1. ЧДД (NPV) – чистый дисконтированный доход:

$$NPV = \sum_{r=1}^n \frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{год}}}{(1+i)^r} - (I_2 - I_1) = \frac{156176}{(1+0,09)^1} + \frac{156176}{(1+0,09)^2} + \frac{156176}{(1+0,09)^3} + \frac{156176}{(1+0,09)^4} - (402690 - 166452) = 206300 \text{ руб.},$$

где I_1 – стоимость насосной установки при дросселировании;

I_2 – стоимость насосной установки при частотном регулировании;

n – срок реализации проекта;

i – норма дисконта, принимаем равной 9%.

2. ИД (PI) – индекс доходности:

$$PI = \frac{\sum_{r=1}^n \frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{год}}}{(1+i)^r}}{(I_2 - I_1)} = \frac{\frac{156176}{(1+0,09)^1} + \frac{156176}{(1+0,09)^2} + \frac{156176}{(1+0,09)^3} + \frac{156176}{(1+0,09)^4}}{(402690 - 166452)} = 1,873$$

3. $T_{\text{ок}}$ – дисконтируемый срок окупаемости:

$$NPV_1 = \frac{156176}{(1+0,09)^1} - (402690 - 166452) = -92960 \text{ руб.};$$

$$NPV_2 = \frac{156176}{(1+0,09)^1} + \frac{156176}{(1+0,09)^2} - (402690 - 166452) = 26660 \text{ руб.};$$

$$NPV_3 = \frac{156176}{(1+0,09)^1} + \frac{156176}{(1+0,09)^2} + \frac{156176}{(1+0,09)^3} - (402690 - 166452) = 125600 \text{ руб.};$$

На рисунке 46 видно, что насосная установка с частотным регулированием окупится через 1 года и 9 месяцев.

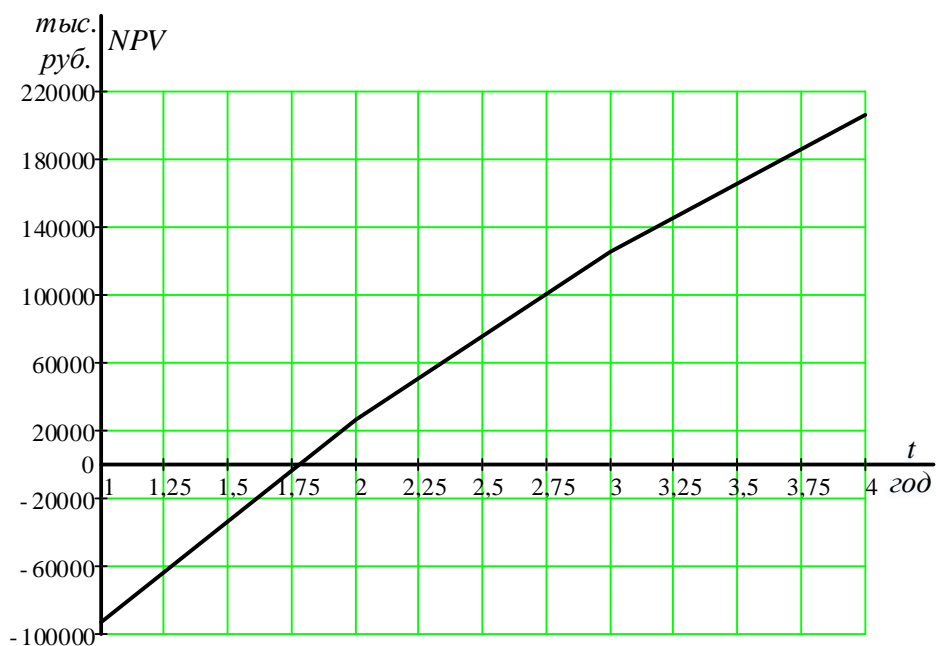


Рисунок 46 - Период окупаемости

4. *ВНД (IRR)* – внутренняя норма доходности:

$$IRR = i \text{ при } NPV = 0;$$

$$NPV_{i=0,1} = 190400 \text{ руб};$$

$$NPV_{i=0,2} = 65030 \text{ руб};$$

$$NPV_{i=0,3} = -17510 \text{ руб};$$

На рисунке 47 представлена внутренняя ставка доходности.

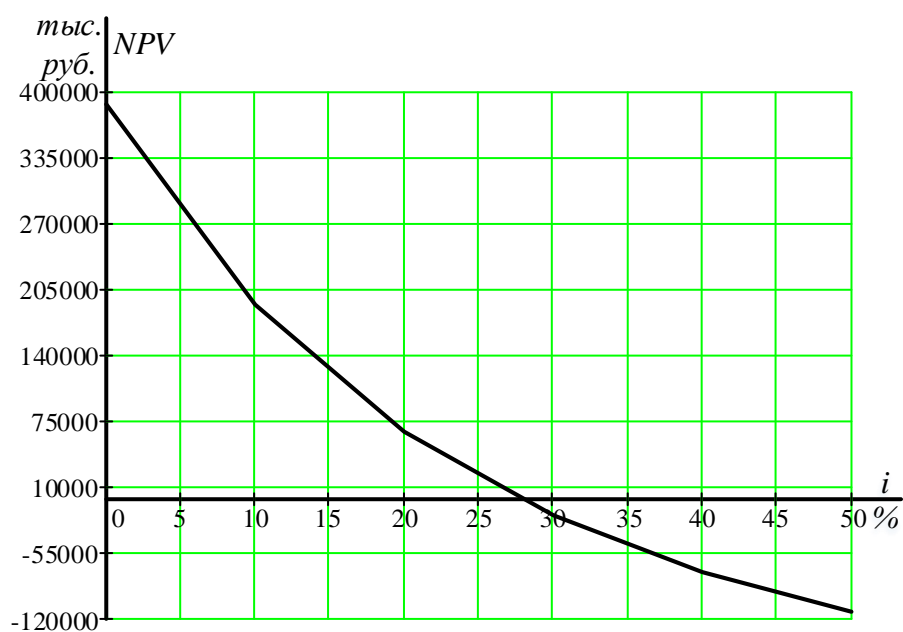


Рисунок 47 - Внутренняя ставка доходности

Внутренняя ставка доходности равна $IRR=28\%$, а это значит, что насосная установка с частотным регулированием может быть реализована.

Посчитав величину экономии, можно наглядно увидеть значительную выгоду от установки частотного преобразователя в насосные станции. Несмотря на то, что при частотном регулировании стоимость насосной установки в 2,5 раза дороже, чем при дросселировании, окупается такая насосная установка всего за 1 год и 9 месяцев и работает в 3-4 раза дольше. Также установка преобразователя частоты позволяет существенно экономить денежные средства на электроэнергии, капитальных ремонтах и обслуживании самой насосной установки, за счёт установленного логического контроллера.

6. Социальная ответственность

В данном разделе дипломного проекта рассмотрены вопросы выполнения требований к безопасности, охране окружающей среды и ресурсосбережению для насосных станций по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель», далее «ПЧ-АД». Система «ПЧ-АД» для насосных станций находит своё применение в водоснабжении жилых многоквартирных домов, частных домов, предприятий. Соответственно пользователями данной системы являются предприятия (организации) обеспечивающие водоснабжение, либо частные лица.

6.1. Анализ вредных факторов, которые может создать объект исследования

Таблица 23 – Опасные и вредные факторы

| Источник фактора | Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74) | | Нормативные документы |
|---|--|--|---|
| | Вредные | Опасные | |
| 1. Плохое крепление двигателя (насоса). 2. Высокая частота коммутации ключей IGBT. 3. Плохое соединение, старение прокладок системы насос – двигатель. 4. Перегрев двигателя, преобразователя частоты 5. Старение изоляции оборудования, повреждение. | 1. Повышенный уровень вибрации. 2. Повышенный уровень производственного шума. 3. Повышенный уровень ультразвука. 4. Повышенная влажность воздуха. | 1. Высокое значение напряжения в электрической цепи, короткое замыкание которой может произойти через тело человека. | 1. СН 2.2.4/2.1.8.566-96 2. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 3. СанПиН 2.2.4./2.1.8.582—96 4. СанПиН 2.2.4.548-96 5. ПТЭЭП |

6.1.1. Повышенный уровень вибрации

Норма промышленной вибрации как общей, так и локальной выбирается в зависимости от её направленности в каждой октавной частоте (1,6 — 1000 Гц) со среднеквадратическими виброскоростями (1,4 — 0,28) 10 – 2 м/с, и логарифмическими уравнениями виброскорости (115 — 109 дБ), а также виброускорением (85 — 0,1 м/с²). Нормирование общей промышленной вибрации производится также в 1/3 октавных полосах частот (1,6 — 80 Гц). [1]

6.1.1.1. Коллективные средства защиты от вибрации

Метод демпфирования – превращение энергии механических колебаний в другие виды энергии (как правило, в тепловую). Чтобы погасить вибрацию данным способом, в конструкцию порождающих и передающих вибрацию деталей вводятся элементы, изготовленные из материалов с большим внутренним трением – резины, специальных видов пластмасс и металлических сплавов, применяются прослойки из вязких жидкостей и сыпучих материалов.

Метод активного виброгашения, при нём разрабатывается управляемая система защиты: она компенсирует силы, вызывающие вибрацию, дополнительным источником энергии. Это способ применяется для защиты операторов и технических устройств в сферах с особо жесткими требованиями к допустимому уровню вибрации (авиации, пассажирских перевозках, космонавтике и не только).

Виброизоляция. Этот способ предохранения состоит в уменьшении передачи колебаний от источника возбуждения предохраняемому объекту при поддержке механизмов, помещаемых между ними. Виброизоляция реализуется включением в колебательную систему добавочной упругой связи, мешающей передаче вибраций от устройства — источника колебаний к основанию или соседним элементам устройства; эта упругая связь может также употребляться для смягчения передачи вибраций от основания на человека либо на оберегаемый агрегат.

6.1.1.2. Индивидуальные средства защиты от вибрации

Платформы – основные средства индивидуальной защиты от вибрации, используемые при работе в положении стоя. Они представляют собой опорные плиты с накладными, встроенными или комбинированными виброизоляторами, которые могут быть резиновыми, пружинными или пневмобаллонными.

Для операторов, выполняющих работу сидя, применяются специальные *виброзащитные сиденья* с упругими и демпфирующими механизмами. Чаще всего их можно встретить на транспортных средствах.

На производственных участках применяются средства индивидуальной защиты от вибрации локального типа – *рукоятки и перчатки* (чтобы обезопасить руки оператора), обувь и стельки (для защиты ног). От обычных перчаток и ботинок такие СИЗ отличаются наличием упругодемпфирующих элементов, которые закрепляются в ладонных частях рукавиц, обувной подошве и других местах.

6.1.2. Повышенный уровень производственного шума

По санитарным нормам, допустимым уровнем шума, который не наносит вреда слуху даже при длительном воздействии на слуховой аппарат, принято считать: 55 децибел (дБ) в дневное время и 40 децибел (дБ) ночью. [2]

6.1.2.1. Коллективные средства защиты от шума

Модифицирование направленности излучения шума. В ряде эпизодов уровень показателя направленности G достигает 10 - 15 дБ, что нужно учитывать при применении установок с устремленным излучением, ориентируя эти установки так, чтобы максимум испускаемого шума было устремлено в другую сторону от рабочего места.

Разумная перепланировка предприятий и технологических помещений позволяет существенно уменьшить уровень шума на рабочих местах за счет роста расстояния до источников шума.

Акустическое обрабатывание помещения – это обрабатывание части внутренних сберегающих поверхностей звукоизолирующими материалами, а также размещение в помещениях одинарных поглотителей, выступающих в роли свободно подвешиваемых объемных поглотителей тел различной формы.

Звукоизоляция относится к строительно-акустическим вариантам борьбы с шумом и заключается в том, чтобы звук, падающий на ограду, приводил его в колебательное движение с частотой, равной частоте колебаний воздуха. В результате оградительное сооружение само становится источником

звука, но интенсивность этих звучаний гораздо меньше интенсивности звука, падающего на преграждение.

6.1.2.2. Индивидуальные средства защиты от шума

Принцип действия средств индивидуальной защиты – обезопасить наиболее чувствительный источник воздействия шума на организм человека – ухо. Применение средств индивидуальной защиты позволяет предупредить повреждения не только слуховых органов, но и центральной нервной системы от воздействия сильного раздражения.

Очень эффективны средства индивидуальной защиты, в диапазоне высоких частот.

Средства индивидуальной защиты включают в себя противошумовые вкладыши (уши-беруши), наушники, каски и шлемы, специализированные костюмы.

6.1.3. Повышенная влажность воздуха

При температуре воздуха на рабочих местах двадцать пять градусов по Цельсию и выше максимальные показатели влажности воздуха не должны превышать следующих значений[4]:

- 70% - при температуре воздуха 25°C;
- 65% - при температуре воздуха 26°C;
- 60% - при температуре воздуха 27°C;
- 55% - при температуре воздуха 28°C.

6.1.3.1. Средства защиты от влажности

В промышленных помещениях, в которых нормальные значения показателей микроклимата нельзя установить из-за технологических запросов к производственному процессу или экономически доказанной бессмысленности, условия микроклимата должно анализировать как вредоносные и тяжёлые. В целях профилактики вредного влияния

микроклимата обязаны быть применены защитные мероприятия (к примеру, системы местного кондиционирования, воздушное душирование, возмещение плохого воздействия одного показателя микроклимата изменением другого, специальная одежда и другие средства индивидуальной защиты, помещения для отдыха и обогрева, распорядок времени работы, в частности, перерывы в работе, уменьшение рабочего дня, увеличение длительности отпуска, увеличение рабочего стажа и др.).

6.2. Анализ опасных факторов, которые может создать объект исследования

6.2.1. Повышенное значение напряжения в электрической цепи

Для защиты работников от возможности удара электрическим током при переходе тока на металлические не предназначенные для тока области (к примеру, при КЗ), используют защитное заземление. Защитное заземление — это запланированное соединение нетоковедущих деталей электрооборудования, которые могут случайно попасть под влияние напряжения, с заземляющим устройством.

Защитное заземление — это система металлических деталей, помещенных в грунт и электрически соединенных специализированными проводами с металлическими частями электрооборудования, не находящимися под напряжением в нормальном состоянии.

Защитное заземление высокоэффективно предохраняет человека от возможности поражения током в сетях напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью и в сетях напряжением выше 1000 В - с любым режимом нейтрали.

Расчет заземлителей заключается в определении численности заземлителей и длины соединителей исходя из разрешенного сопротивления заземления.

Таблица 24 - Исходные данные

| Вид заземления | контурное |
|--|-----------|
| Длина заземлителя l , м | 2,7 |
| Глубина заземлителя в грунте h , м | 0,65 |
| Сезонный коэффициент K_c | 2,0 |
| Удельное сопротивление земли ρ , Ом·м | 70 |
| Диаметр d , мм | 55 |
| Ширина соединительной полосы b , мм | 50 |
| Допустимое сопротивление системы заземления по ПУЭ РЭ.Н., Ом | 4 |

1. В качестве заземляющего устройства выбирается стальная трубка диаметром $d = 55 \text{ мм}$, а в качестве соединяющего элемента – стальная полоска шириной $b = 50 \text{ мм}$.

2. Выбирается значение сопротивления грунта близкое по величине к удельному сопротивлению грунта в районе размещения установки или устройства.

3. Определяется величина электрического сопротивления растекания тока в грунт с одного заземлителя

$$R_z = 0,366 \frac{\rho \cdot K_c}{l} \left(\lg \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t + l}{4t - l} \right) =$$

$$= 0,366 \frac{70 \cdot 2}{2,7} \left(\lg \frac{2 \cdot 2,7}{0,055} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 2 + 2,7}{4 \cdot 2 - 2,7} \right) = 40,62 \text{ Ом.}$$

где $\rho = 70 \text{ Ом}$ - удельное сопротивление грунта,

$K_c = 2,0$ - коэффициент сезонности,

$l = 2,7 \text{ м}$ - длина заземлителя,

$d = 55 \text{ мм}$ - диаметр заземлителя,

$t = h + 0,5l = 0,65 + 0,5 \cdot 2,7 = 2 \text{ м}$ - длина от поверхности земли до середины заземлителя.

4. Рассчитывается число заземлителей без взаимных помех, получаемых друг от друга, так называемого явления “экранирования”

$$n' = \frac{R_z}{R_{зи}} = \frac{40,62}{4} = 10,15 \approx 10.$$

5. Рассчитывается число заземлителей с коэффициентом экранирования

$$n = \frac{n'}{\eta_3} = \frac{10}{0,58} = 17,24 \approx 18$$

где $\eta_3 = 0,58$ - коэффициент экранирования (прил., табл.1.).

Принимаем расстояние между заземлителями $a = l = 2,7 \text{ м}$

6. Определяется длину соединительной полосы

$$l_{II} = 1,05 \cdot n \cdot a = 1,05 \cdot 18 \cdot 2,7 = 51,03 \text{ м.}$$

7. Рассчитывается значение сопротивления растекания тока с соединительной полосы

$$R_{II} = 0,366 \frac{\rho \cdot K_c}{l_{II}} \lg \frac{2 \cdot l_{II}^2}{b \cdot h} = 0,366 \frac{70 \cdot 2}{51,09} \lg \frac{2 \cdot 51,03^2}{0,05 \cdot 0,65} = 5,2 \text{ Ом.}$$

8. Рассчитывается полное сопротивление системы заземления

$$R_{\Sigma} = \frac{R_3 \cdot R_n}{R_3 \cdot \eta_n + R_n \cdot \eta_3 \cdot n} = \frac{40,62 \cdot 5,2}{40,62 \cdot 0,51 + 5,2 \cdot 0,58 \cdot 18} = 2,82 \text{ Ом.}$$

где $\eta_n = 0,51$ - коэффициент экранирования полосы

Вывод:

Сопротивление $R_{\Sigma} = 2,82 \text{ Ом}$ меньше допустимого сопротивления, равного 4 Ом . Следовательно, диаметр заземлителя $d = 55 \text{ мм}$ при числе заземлителей $n = 18$ является достаточным для обеспечения защиты при контурной схеме расположения заземлителей.

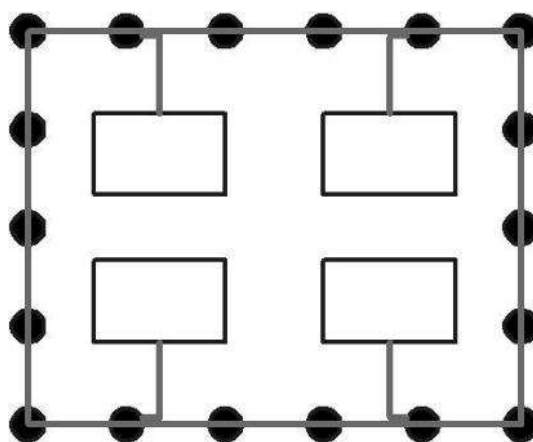


Рисунок 48 - Схема полученного контурного заземления

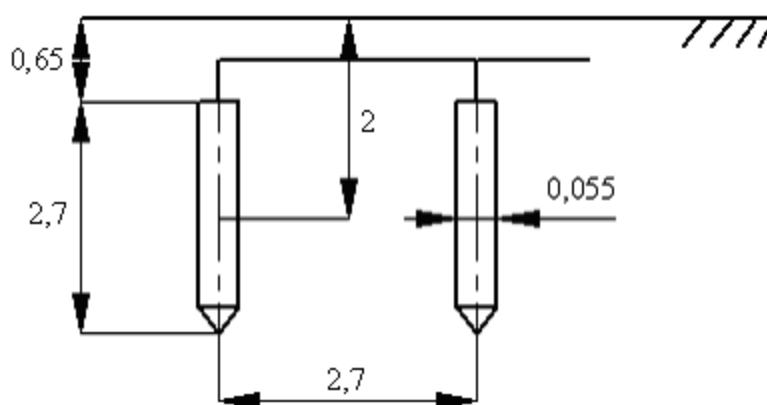


Рисунок 49 - Схема расположения заземлителей

6.3. Охрана окружающей среды

Охрана окружающей среды является одним из самых важных факторов человеческой деятельности. При работе с программным обеспечением, в частности, проверке режимов работы электропривода, можно внести значительный вклад в охрану окружающей среды. При проверке работы электропривода в статическом и динамическом режимах можно увидеть график потребляемой системой мощности. И разработчик уже на начальном этапе проектирования может значительно сократить потребление мощности электроприводом. А это, как следствие ведет к экономии электроэнергии и делает эксплуатацию электропривода более дешёвой.

Учитывая, что на современных промышленных предприятиях более 80% потребляемой энергии приходится на долю электроприводов, используя современные методы расчёта можно существенно снизить потребляемую предприятием мощность и, как следствие, привести к экономии природных ресурсов, используемых для выработки электроэнергии. К ним относят: нефть, газ, каменный уголь. Понятно, что это невозполнимые ресурсы. Приводят следующие сроки обеспеченности человечества этими природными ресурсами: нефть 30 лет, уголь 500 лет, газ 1000 лет. Переход на новую технологию производства, позволяющую возможно более полно и комплексно использовать первичное сырьё и экономить электроэнергию, выступает как одно из ведущих направлений технического процесса.

На начальном этапе разработки уже возможно значительное уменьшение вибрационных и шумовых эффектов работы электропривода. При применении в разрабатываемом электроприводе достижений научных разработок, современной элементной базы возможны значительные снижения габаритов, массы, стоимости электропривода. Это в конечном итоге приводит к значительной экономии материалов, природных ресурсов, благоприятно сказывается на здоровье персонала, обслуживающего электропривод.

Учёные многих стран мира сейчас энергично занимаются разработкой вопроса о будущем человечества в условиях стремительно нарастающих темпов роста населения и развития отраслей хозяйства. Занимаются этой разработкой и российские учёные. Результаты её показывают, что человечество ожидают различного рода катастрофы, причинами которых явятся неразумные взаимодействия общества с природой в процессе хозяйственной деятельности. Хотя такой вывод и основан на приблизительных расчётах, но в нём имеется значительная доля правды.

Данная система ПЧ-АД работает на электроэнергии, и, следовательно, не загрязняет окружающую среду вредными выбросами.

6.4. Защита в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией при работе насосной станции является пожар на рабочем месте. Возникновение других видов ЧС маловероятно, соответственно рассмотрению не подлежат.

Пожарная защита – это комплексная мера организационных и технологических средств, которые направлены на ограждение воздействий на любой из опасных факторов пожара и ограничение материального ущерба от него.

Требования к способам обеспечения пожарной безопасности системы противопожарной защиты:

- противопожарная защита в проекте достигается применением автоматических установок пожарной сигнализации и пожаротушения;

- организация с помощью технических средств, включая автоматические своевременного оповещения и эвакуации людей;

- ограничения распространения пожара за пределы очага достигается установлением предельно допустимых по технико-экономическим расчетам площадей, противопожарных отсеков, секций, а также этажности зданий и сооружений, но не более определенных норм;

- в зданиях и сооружениях предусматривают технические средства (лестничные клетки, противопожарные стены, наружные пожарные лестницы, аварийные люки), имеющие место устанавливать при пожаре и огнеопасности конструкций.

- Пожары могут возникнуть от электроустановок, в которых присутствуют нагревающиеся проводники электрического тока и горючее вещество (изоляция этих проводников). При коротких замыканиях электрические проводники быстро разогреваются до высоких температур.

- Во избежание возникновения пожаров курить разрешается только в специально отведенных местах.

Предусматриваемые при проектировании зданий и установок противопожарные мероприятия зависят прежде всего от пожарной или взрывной опасности размещенных в них производств и отдельных помещений. Помещения и здания в целом делятся по степени пожаро - или взрывоопасности на пять категорий в соответствии с НАПБ Б.07.005–86 "Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности" ОНТП 24–86.

Категория А - это помещения, в которых применяются легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки паров 28С и ниже или горючие газы в таком количестве, что они могут образовать взрывоопасную смесь с воздухом, при взрыве которой создается давление более 5 кПа (например, склады бензина).

Категория Б - это помещения, в которых выделяются переходящие во взвешенное состояние горючие волокна или пыль, а также легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки паров более 28С

в таком количестве, что образуемая ими с воздухом смесь при взрыве может создать давление более 5 кПа (цеха приготовления сеной муки, выбойные и размольные отделения мельниц и крупорушек, мазутное хозяйство электростанций и котельных).

Категория В - это помещения, в которых обрабатывают или хранят твердые горючие вещества, в том числе выделяющие пыль или волокна, неспособные создавать взрывоопасные смеси с воздухом, а также горючие жидкости (лесопильные, столярные и комбикормовые цехи; цехи первичной сухой обработки льна, хлопка; кормокухни, зерноочистительные отделения мельниц; закрытые склады угля, склады топливно-смазочных материалов без бензина; электрические РУ или подстанции с трансформаторами).

Категория Г - это помещения, в которых сжигают топливо, в том числе газ, или обрабатывают несгораемые вещества в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии (котельные, кузницы, машинные залы дизельных электростанций).

Категория Д - это помещения, в которых негорючие вещества находятся в практически холодном состоянии (насосные оросительные станции; теплицы, кроме отапливаемых газом, цехи по переработке овощей, молока, рыбы, мяса).

Категории производств по пожарной опасности в большой степени определяют требования к конструктивным и планировочным решениям зданий и сооружений, а также другим вопросам обеспечения пожаро- и взрывобезопасности. Они отвечают нормам технологического проектирования или специальным перечням, утверждаемым министерствами (ведомствами).

Условия возникновения пожара в зданиях и сооружениях во многом определяются степенью их огнестойкости (способность здания или сооружения в целом сопротивляться разрушению при пожаре). Здания и сооружения по степени огнестойкости согласно СНИП 2.01.02-85 подразделяются на пять степеней (I, II, III, IV и V). Степень огнестойкости здания (сооружения) зависит от возгораемости и огнестойкости основных строительных конструкций и от распространения огня по этим конструкциям.

По возгораемости строительные конструкции подразделяются на негорючие, трудногорючие и горючие. Негорючие конструкции выполнены из негорючих материалов, трудногорючие - из трудногорючих или из горючих, защищенных от огня и высоких температур негорючими материалами (например, противопожарная дверь, выполненная из дерева и покрытая листовым асбестом и кровельной сталью).

Огнестойкость строительных конструкций характеризуется их пределом огнестойкости, под которым понимают время в часах, по истечении которого они теряют несущую или ограждающую способность, т. е. не могут выполнять свои обычные эксплуатационные функции.

Согласно классификации производства по пожарной опасности (ППБ-03) насосная станция относится к категории Д.

6.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В соответствии с Трудовым кодексом РФ, в целях обеспечения требований охраны труда осуществляется контроль за их выполнением, в каждой организации численностью более 100 сотрудников создается служба охраны труда. Либо заключается договор со специалистами. Служба охраны труда подчиняется руководителю предприятия. На должность специалиста по охране труда назначаются имеющие квалификацию инженера по охране труда или прошедшие специальное обучение.

В нашем случае насосная станция включает более 10 человек, поэтому, в соответствии с Трудовым кодексом, на производстве с численностью более десяти человек должны создаваться комитеты по охране труда, в состав которых входят представители работодателя и профсоюзов. Задачами комитета являются: организация по обеспечению выполнения работниками требований по охране труда, контроль за соблюдением охраны труда, информация о состоянии охраны труда. Комитет по охране труда ведет учет и анализ производственного травматизма и профессиональных заболеваний, измерение величин опасных и вредных факторов, оценку травмобезопасности, аттестацию рабочих мест,

приемку в эксплуатацию производственных объектов, согласование документации в области охраны труда, участие в расследовании несчастных случаев, обучение по охране труда в соответствии со следующими документами:

- Трудовой кодекс РФ;
- ГОСТ 12.0.003–74 ССБТ;
- ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ;
- ГОСТ 12.0.004-90 ССБТ;
- ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ;
- ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ;
- СНиП П-12-77;
- СанПиН 1757-77;
- СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03;
- СНиП 2.04. 05-91.

Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был исследован технологический процесс поддержания давления воды, а также приведен обзор насосных станций. На основе исходных данных выполнен выбор релейно-контакторной аппаратуры, системы защит, электродвигателя, насосного агрегата, преобразователя частоты и логического контроллера Siemens Logo.

Были рассчитаны и построены механические и электромеханические характеристики АД для закона $\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}$.

Системы скалярного управления имеют ряд преимуществ перед другими системами: простота, надёжность, требуется минимум информации о двигателе, нет необходимости в использовании датчиков скорости и положения ротора.

Для исследования системы автоматического поддержания давления воды синтезирована имитационная модель асинхронного электропривода насоса с учётом рассчитанных данных. Исследование режимов работы модели и оценка её адекватности выполнены в среде моделирования MatLab. Полученные результаты работы модели в режиме поддержания давления свидетельствуют о корректности настройки технологического ПИ-регулятора.

Была разработана и собрана в программной среде Logo! Soft Comfort v7.0 модель технологического процесса насосной станции, что позволило с помощью простых логических элементов доступно показать, как работают подобные комплексы систем.

В заключение хотелось бы отметить, что зачастую лица принимающие решения по модернизации оборудования, изучив стоимость внедрения преобразователей частоты, откладывают решение в долгий ящик, не осознавая долгосрочную выгоду проекта в целом. В действительности, каждое внедрение требует экономической оценки. И, безусловно, большинство компетентных инженеров в состоянии провести соответствующее технико-экономическое исследование. Тем более что рынок преобразователей достаточно насыщен и имеет широкий горизонт цен, в зависимости от функциональности и марки

устройства. Применение на практике преобразователей частоты в насосных станциях показало, что:

- экономия электроэнергии, за счет организации работы электропривода в зависимости от реального потребления воды достигает 20-50%;
- снижение расхода воды, за счет снижения утечек, возникающих при повышенном давлении в магистрали, когда водопотребление в действительности невелико (в среднем на 5%);
- уменьшение затрат на плановый и капитальный ремонт сооружений и оборудования (всей инфраструктуры подачи воды), в результате пресечения аварийных ситуаций, вызванных в частности гидравлическим ударом, который нередко происходит в случае использования нерегулируемого электропривода (ресурс службы оборудования повышается минимум в 1,5 раза);
- достижение экономии тепла в системах горячего водоснабжения за счет снижения потерь воды, несущей тепло.

Список использованных источников

1. СН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы»
2. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»
3. СанПиН 2.2.4/2.1.8.582-96 «Гигиенические требования при работах с источниками воздушного и контактного ультразвука промышленного, медицинского и бытового назначения»
4. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4.548-96
5. Эпштейн И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока. – М.: Энергоиздат, 1982.
6. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Расчёт характеристик электроприводов переменного тока. Ч.1. Асинхронный двигатель: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 136 с.
7. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о датчике давления воды URL: <http://www.intechnics.ru>
8. Мощинский Ю. А., Беспалов В. Я., Кирякин А. А. Определение параметров схемы замещения машины по каталожным данным. // Электричество. – 1998. – №4. – С. 38 – 42.
9. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. – М.: Наука, 1966. – 300 с.
10. Насосы. Вентиляторы. Кондиционеры: Справочник/Е.М. Росляков, Н.В. Коченков, И.В. Золотухин др., Под редакцией Е.М. Росляков – СПб.: Политехника, 2006. – 822с.
11. Семидуберский М.С насосы, компрессоры, вентиляторы. Учебник для техникумов. Изд. 4-е перераб. и доп. М., «Высшая школа», 1974 – 232с.
12. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор)/ Л.Х. Дацковский, Б.И. Абрамов и др.// Электротехника 1996. - №10. - С. 18-28.

13. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о шкафах управления насосами URL: <http://www.aekc.ru/>
14. М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В. М. Терехов, А.В. Шинянский Основы автоматизированного электропривода. Учеб. Пособие для вузов. М., «Энергия», 1974. – 568 с.
15. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М., «Энергия», 1972. – 240 с.
16. В.И. Ключев «Теория электропривода», М: Энергоиздат, 1998.
17. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о насосе URL: <http://nasos.info/catalog.php?mode=view&id=6914>
18. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о преобразователе частоты URL: <http://www.vesper.ru/catalog/invertors/ei-p7012/spec-7012>
19. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о контакторах URL: <http://realenergo.net/product/kontaktery-serii-ci-6-50-prednaznacheny-dlja-raboty-v-diapazone-moshnostej-22-25-kvt/>
20. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения об автоматических выключателях URL: <http://www.elektroportal.com/series/show/va-5735>
21. Каталог продукции ОАО «Сибэлектромотор», 2010.
22. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о блоке питания URL: http://www.promspecrele.ru/documents/6ep1332_1sh51_logo__power__24c2__4_0c0__90_c2f2.html
23. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о логическом модуле URL: http://www.promspecrele.ru/documents/12_24rc.html
24. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о модуле ввода-вывода дискретных сигналов URL: http://www.promspecrele.ru/documents/dm8_12_24r.html

25. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения об электродвигателях URL:

http://ekb.pulscen.ru/products/elektrodvigatel_air_5am_ad_4am_aim_160_s4_15_kv_t_1500_ob_17310390

26. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о преобразователях частоты URL: <http://elleron.ru/search/?q=EI-P7012>

27. Применение частотного регулирования в квартальных системах теплоснабжения [Электронный ресурс] URL: http://www.aqua-therm.ru/articles/articles_309.html

28. ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.

29. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

30. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Защитное заземление, зануление.

31. ГОСТ 12.0.003–74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

32. ГОСТ 12.1.005–88 (с изм. №1 от 2000 г.). ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (01. 01.89).

33. ГОСТ 12.1.019 -79 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

34. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.

35. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. М.: Госкомсанэпиднадзор России, 2003.

36. Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценки факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. – М.: Минздрав России, 1999.

37. СН 2.2.4/2.1.8.556–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. – М.: Минздрав России, 1997.

38. Социальная ответственность: понятия и виды [Электронный ресурс]
URL: <http://all-books.biz/teoriya-gosudarstva-prava-uchebnik/sotsialnaya-otvetstvennost-ponyatie.html>
39. Типовая инструкция по охране и безопасности труда при обслуживании насосных станций [Электронный ресурс] URL: <http://busel.org/texts/cat5vy/id5awyeet.htm>
40. Энергетика и окружающая среда [Электронный ресурс] URL: http://www.esco-ecosys.narod.ru/2007_10/art38_9.htm
41. Тепловые электростанции и окружающая среда [Электронный ресурс] URL: <http://tochka-rosta.pro/Novosti/teplovye-elektrostantsii-i-okruzhayushhaya-sreda.html>
42. Гидроэлектростанции и окружающая среда [Электронный ресурс] URL: <http://tochka-rosta.pro/Novosti/gidroelektrostantsii-i-okruzhayushhaya-sreda.html>
43. Атомные электростанции и окружающая среда [Электронный ресурс] URL: <http://tochka-rosta.pro/Novosti/atomnye-elektrostantsii-i-okruzhayushhaya-sreda.html>

Приложение А

Таблица А.1 - Технические данные блока питания LOGO! Power 24В/4А

| | |
|---|---|
| Номинальное входное напряжение, В | ~100 ... 240 |
| Номинальное выходное напряжение, В | =24 |
| Входные цепи | |
| Номинальное входное напряжение $U_{\text{вх.ном}}$, В | ~100 ... 240; широкий диапазон входных напряжений |
| Допустимый диапазон изменения входных напряжений, В | ~85 ... 264 |
| Номинальное входной ток $I_{\text{вх.ном}}$, А | 1,95 ... 0,97 |
| Выходные цепи | |
| Номинальное выходное напряжение $U_{\text{вых.ном}}$, В | =24 |
| Допустимые отклонения выходного напряжения: <div style="margin-left: 20px;"> ➤ статическая компенсация при изменениях входного напряжения ➤ статическая компенсация при изменении нагрузки </div> | <div style="text-align: center;"> $\pm 3 \%$ 00,1 % 1,5 % </div> |
| Номинальное выходной ток $I_{\text{вых.ном}}$, А | 4 |

Таблица А.2 - Сигналы цепи управления логического контроллера

| | | | |
|--------------------|---|-----------------------------------|-----------------|
| Входы контроллера | Дискретные сигналы контроллера | | Кол-во сигналов |
| | Информация о срабатывании контактора К1 | Состояние контактора двигателя М1 | 1 |
| | Информация о срабатывании контактора К2 | Состояние контактора двигателя М2 | 1 |
| | Информация о срабатывании контактора К3 | Состояние контактора двигателя М1 | 1 |
| | Сигнал готовности с ПЧ | ПЧ готов к работе | 1 |
| | Всего | | 4 |
| | Аналоговые сигналы контроллера | | Кол-во сигналов |
| | Давление | Аналоговый сигнал о давлении | 1 |
| | Всего | | 1 |
| Выходы контроллера | Дискретные сигналы контроллера | | Кол-во сигналов |
| | На ПЧ | Сигнал на задание скорости М1 | 1 |
| | На ПЧ | Сигнал на задание скорости М2 | 1 |
| | На контактор К1 | Пуск двигателя М1 | 1 |
| | На контактор К2 | Пуск двигателя М2 | 1 |
| | На контактор К3 | Пуск двигателя М1 | 1 |
| | Всего | | 5 |

Приложение Б

Схема алгоритма работы АСУ ТП

